

**OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO ENERGÉTICO DE CLIMATIZACIÓN
HÍBRIDA INTELIGENTE (NATURAL Y MECÁNICA) EN UN ENTORNO
TROPICAL SEGÚN UN MODELO ESTABLECIDO DEL COMPORTAMIENTO
ENERGÉTICO ESPECÍFICO**



**Andrés Mauricio Gómez Carreño
Cristian Leonardo Hernández Hernández
Cristhiam David Orduz Parra**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2015**

**OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO ENERGÉTICO DE CLIMATIZACIÓN HÍBRIDA
INTELIGENTE (NATURAL Y MECÁNICA) EN UN ENTORNO TROPICAL
SEGÚN UN MODELO ESTABLECIDO DEL COMPORTAMIENTO
ENERGÉTICO ESPECÍFICO**

**Andrés Mauricio Gómez Carreño
Cristian Leonardo Hernández Hernández
Cristhiam David Orduz Parra**

**Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electricista e ingeniero
electrónico**

Director:

MSc. German Alfonso Osma P

Codirector:

Dr. Daniel Alfonso Sierra Bueno

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2015**

Primero que todo a Dios, sin él nada de esto hubiese sido posible.

A mi madre, por ser la luz que guía mis pasos y porque sé que siempre ha estado a mi lado. Este triunfo también es suyo.

A mi hermana, mi padrastro y toda mi familia, que en todo este camino me han acompañado y han estado conmigo en los momentos más duros de la vida.

A mi padrino Luis Armando, su esposa Patricia, sus hijos Laura y Jorge y toda la familia Gómez Rojas, por su respaldo y confianza incondicionales en todos estos años.

A Mónica, por apoyarme y darme fuerzas en los momentos más difíciles, por estar junto a mí durante esta parte importante de mi vida y por compartir conmigo todos estos años de felicidad.

A mis compañeros en este trabajo, Andrés y Cristian, es una gran satisfacción ver los resultados del esfuerzo realizado.

A todos mis amigos, ya que de ellos he aprendido a ser mejor persona.

Y por último, pero no menos importante, a la Universidad Industrial de Santander y los profesores de los que fui alumno, por la enseñanza y las oportunidades brindadas.

A todos los demás, muchas gracias.

Cristhiam David Orduz Parra

A mi Madre, sin ella nada de esto hubiese sido posible, mujer fuerte y luchadora.

A mí padrastro y hermanas apoyos incondicionales.

A mi novia por su amor y paciencia.

A mis compañeros de proyecto, todos hicimos grandes sacrificios.

*Con cariño especial a Germán Estupiñan y a Sergio Rueda,
por enseñarme el amor de clase.*

*Al MODEP por acogerme y motivarme a luchar por una educación
pública y de calidad.*

*Por último, al profesor Daniel Sierra y al conjunto de los profesores de la E3T,
que con sus enseñanzas construyen profesionales capacitados y éticos.*

Cristian Leonardo Hernández Hernández

A mi padre; mi modelo a seguir, por la confianza, el ejemplo y enseñarme el valor de la educación desde siempre.

A mi madre; ejemplo de fortaleza, por sus abrazos cada mañana, su amor y apoyo en todo este proceso.

A Lorena; mi compañía, mi felicidad, por darme la fuerza que para levantarme cuando lo necesitaba.

A mis hermanos; motivación inicial en todo esto.

A mis amigos, por los momentos compartidos y las enseñanzas que quedaron.

Andrés Mauricio Gómez Carreño

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	18
1.1	DECLARACIÓN DEL PROBLEMA	19
1.2	OBJETIVOS Y ALCANCE	20
1.3	ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	20
2	GENERALIDADES	22
2.1	MARCO TEÓRICO	22
2.2	MODELO CIRCUITAL	25
2.3	TEMPERATURA INTERIOR A TRAVÉS DEL MODELO CIRCUITAL	35
2.4	FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN	40
3	PRESENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN	45
3.1	INVERSIÓN	48
3.2	COSTO DEL CONSUMO ENERGÉTICO	53
3.3	COSTO DE MANTENIMIENTO ANUAL	59
3.4	PLANTEAMIENTO DEL MODELO TÉRMICO	61
4	PLANTEAMIENTO DE LA PROGRAMACIÓN NO LINEAL PARA EL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN	64
4.1	DEFINICIÓN DE LOS ÍNDICES	65
4.2	DEFINICIÓN DE LOS VALORES CONSTANTES	65
4.3	DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS ASIGNADOS A LOS ÍNDICES	66
4.4	ASIGNACIÓN DE NOMBRE A LAS VARIABLES Y AGRUPACIÓN SEGÚN SU TIPO	66
4.5	PRESENTACIÓN DE LAS ECUACIONES DEL MODELO	67
4.6	DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO	68
4.7	DEFINICIÓN DEL MODELO Y DE LAS ECUACIONES A INCLUIR	68
4.8	DECLARACIÓN DEL TIPO DE ALGORITMO PARA SOLUCIONAR EL MODELO	68

5	PLANTEAMIENTO DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN	70
5.1	DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO	71
5.2	PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO.	75
5.3	POBLACIÓN INICIAL	75
5.4	CODIFICACIÓN DE CROMOSOMAS	76
5.5	DECODIFICACIÓN DE CROMOSOMAS	77
5.6	COSTO DE LOS CROMOSOMAS	78
5.7	ELECCIÓN DE LA FUNCIÓN DE SELECCIÓN	78
5.8	REPRODUCCIÓN	78
5.9	MUTACIÓN	79
5.10	GENERACIONES	79
5.11	CONVERGENCIA	80
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS	81
6.1	BÚSQUEDA POR PROGRAMACIÓN NO LINEAL	81
6.2	BÚSQUEDA POR ALGORITMOS GENÉTICOS	83
6.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS: PROGRAMACIÓN NO LINEAL VS ALGORITMOS GENÉTICOS	85
6.4	ESTRATEGIAS DE CLIMATIZACIÓN EN CADA ESPACIO.	86
6.5	COMPARACIÓN ENTRE LA SOLUCIÓN OBTENIDA Y LA SOLUCIÓN TRADICIONAL	88
6.6	APLICACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE CLIMATIZACIÓN	92
7	ANÁLISIS DE TENDENCIAS	100
8	CONCLUSIONES	104
	REFERENCIAS	107

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Sección de edificación</i>	26
<i>Figura 2. Zonificación de la sección de edificio</i>	26
<i>Figura 3. Modelo térmico muro exterior.</i>	27
<i>Figura 4. Modelo térmico del espacio interior.</i>	28
<i>Figura 5. Modelo térmico muro interior.</i>	30
<i>Figura 6. Modelo térmico del piso</i>	31
<i>Figura 7. Modelo térmico fachada sur</i>	32
<i>Figura 8. Modelo térmico fachada norte</i>	33
<i>Figura 9. Circuito equivalente para hallar la temperatura interior del espacio 1.</i> ...	36
<i>Figura 10. Temperatura interior del espacio 1 de 8-9 am</i>	36
<i>Figura 11. Temperatura interior del espacio 1 de 3-4 pm.</i>	37
<i>Figura 12. Circuito equivalente para hallar la temperatura interior del espacio 2.</i> .	37
<i>Figura 13. Temperatura interior del espacio 2 de 8-9 am.</i>	38
<i>Figura 14. Temperatura interior del espacio 2 de 3-4 pm.</i>	38
<i>Figura 15. Circuito equivalente para hallar la temperatura interior del espacio 3</i> ..	39
<i>Figura 16. Temperatura interior del espacio 3 de 8-9 am.</i>	39
<i>Figura 17. Temperatura interior del espacio 3 de 3-4 pm.</i>	40
<i>Figura 18. Esquema del controlador</i>	41
<i>Figura 19. Flujograma de operación de las estrategias de climatización.</i>	42
<i>Figura 20. Diagrama de flujo para determinar el valor de A.A.</i>	43
<i>Figura 21. Región factible de un problema de optimización.</i>	46
<i>Figura 22. Diagramas de flujo financiero.</i>	46
<i>Figura 23. Pasos para el desarrollo en GAMS.</i>	64
<i>Figura 24. Declaración de índices para el tiempo en años y el tiempo en horas.</i> ..	65
<i>Figura 25. Definición de valores constantes.</i>	65
<i>Figura 26. Definición de parámetros del modelo.</i>	66
<i>Figura 27. Definición de variables enteras del modelo.</i>	67
<i>Figura 28. Definición de variables binarias del modelo.</i>	67
<i>Figura 29. Declaración de las ecuaciones del modelo.</i>	67
<i>Figura 30. Declaración de la función objetivo.</i>	68
<i>Figura 31. Definición del modelo y sus ecuaciones.</i>	68
<i>Figura 32. Declaración del tipo de algoritmo.</i>	69
<i>Figura 33. Elección del solver.</i>	69
<i>Figura 34. Pasos para el desarrollo del A.G.</i>	70
<i>Figura 35. Vector de diseño para el AG.</i>	73

<i>Figura 36. Región de solución del AG.</i>	74
<i>Figura 37. Estados de operación y temperatura ambiente en el espacio 1.</i>	87
<i>Figura 38. Estados de operación y temperatura ambiente en el espacio 2.</i>	87
<i>Figura 39. Estados de operación y temperatura ambiente en el espacios 3.</i>	88
<i>Figura 40. Consumo energético. Comparación entre estrategia tradicional y solución óptima en el espacio 1.</i>	90
<i>Figura 41. Consumo energético. Comparación entre estrategia tradicional y solución óptima en el espacio 2.</i>	90
<i>Figura 42. Consumo energético. Comparación entre estrategia tradicional y solución óptima en el espacio 3.</i>	91
<i>Figura 43. Consumo energético. Comparación entre estrategia tradicional y solución óptima en los 3 espacios.</i>	92
<i>Figura 44. Temperatura interior con estrategia de ventilación natural para el espacio 1 de 8-9 am.</i>	93
<i>Figura 45. Temperatura interior con estrategia de aire acondicionado para el espacio 1 de 3-4 pm.</i>	94
<i>Figura 46. Temperatura interior con estrategia de aire acondicionado para el espacio 2 de 8-9 am.</i>	95
<i>Figura 47. Temperatura interior con estrategia de aire acondicionado para el espacio 2 de 3-4 pm.</i>	95
<i>Figura 48. Temperatura interior con estrategia de ventilación forzada para el espacio 3 de 8-9 am.</i>	96
<i>Figura 49. Temperatura interna con estrategia de aire acondicionado para el espacio 3 de 3-4 pm.</i>	97
<i>Figura 50. Comportamiento de la temperatura interior, temperatura ambiente y presencia en el espacio 1.</i>	98
<i>Figura 51. Comportamiento de la temperatura interior, temperatura ambiente y presencia en el espacio 2.</i>	98
<i>Figura 52. Comportamiento de la temperatura interior, temperatura ambiente y presencia en el espacio 3.</i>	99
<i>Figura 53. Área de la ventana vs VPN.</i>	101
<i>Figura 54. Temperatura de confort vs VPN</i>	102
<i>Figura 55. Uso del espacio vs VPN</i>	103

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Variables muro exterior</i>	27
<i>Tabla 2. Variables espacio interior</i>	28
<i>Tabla 3. Variables muro interior</i>	30
<i>Tabla 4. Variables modelo térmico del piso.</i>	31
<i>Tabla 5. Variables modelo térmico fachada sur.</i>	32
<i>Tabla 6. Variables modelo térmico fachada norte.</i>	33
<i>Tabla 7. Valores de resistencia térmica según material.</i>	34
<i>Tabla 8. Cálculo densidad del aire</i>	35
<i>Tabla 9. Representación de las estrategias de climatización consideradas.</i>	44
<i>Tabla 10. Costo de los extractores de acuerdo a su capacidad y caudal.</i>	48
<i>Tabla 11. Costo de aire acondicionado independiente por aula</i>	51
<i>Tabla 12. Costo de unidades centrales de aire acondicionado.</i>	52
<i>Tabla 13. Costo mantenimiento para las unidades de aire acondicionado</i>	60
<i>Tabla 14. Costo mantenimiento aire acondicionado con unidad central</i>	61
<i>Tabla 15. Características equipo de cómputo.</i>	81
<i>Tabla 16. Características programación no lineal.</i>	82
<i>Tabla 17. Resultados simulación GAMS</i>	82
<i>Tabla 18. Características método de heurística AG.</i>	83
<i>Tabla 19. Resultados simulación MATLAB</i>	84
<i>Tabla 20. Comparación PNL Vs AG</i>	86

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. CONSIDERACIONES PARA HALLAR EL MODELO TÉRMICO BASE A TRAVÉS DE UNA SECCIÓN DE EDIFICIO	110
ANEXO B. COMPARACIÓN DEL COSTO Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS SENSORES Y DETECTORES DE APERTURA.....	120
ANEXO C. R_t y C_{mnt} PARA SOLUCION ÓPTIMA Y TRADICIONAL	125

RESUMEN

TÍTULO: OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO ENERGÉTICO DE CLIMATIZACIÓN HÍBRIDA INTELIGENTE (NATURAL Y MECÁNICA) EN UN ENTORNO TROPICAL SEGÚN UN MODELO ESTABLECIDO DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO ESPECÍFICO*

AUTORES: CRISTIAN LEONARDO HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, CRISTHIAM DAVID ORDUZ PARRA, ANDRÉS MAURICIO GÓMEZ CARREÑO**

PALABRAS CLAVES: optimización, valor presente neto, automatización, modelado RC, climatización híbrida, programación no lineal, algoritmos genéticos.

DESCRIPCIÓN: El acondicionamiento térmico de edificaciones es hoy en día uno de los aspectos indispensables a la hora de realizar construcciones amigables con el medio ambiente, por la importancia que tiene aprovechar el comportamiento térmico y los factores ambientales que permiten tener condiciones de adaptabilidad térmica. La climatización es la mejor solución que se le puede dar a muchas de las inconformidades que puede tener el ser humano dentro de un ambiente, ya sea este comercial, residencial o industrial esta puede ser natural, artificial e híbrida. En este caso particular se abordaron los sistemas de climatización híbridos.

En la medida en que el consumo energético que se necesita aumenta para satisfacer necesidades de confort, menos eficiente va a ser el sistema de climatización que se esté implementando; por esta razón debe hacerse notar que es de gran importancia apoyar el mejoramiento del diseño de climatización de diversas zonas de la edificación a partir de un proceso de optimización que busque el menor consumo energético y el menor costo financiero.

Este trabajo de grado plantea y soluciona un problema de optimización que permite evaluar la utilización de sistemas híbridos de climatización para una sección de edificio utilizada como aulas de clase. Se hace uso de tres estrategias, de climatización: ventilación natural, ventilación forzada y aires acondicionados, teniendo en cuenta las características de los recursos disponibles en el mercado y las características ambientales en conjunto con parámetros financieros y de calidad que permiten evaluar la viabilidad del sistema a implementar.

* Trabajo de grado

** School of Physics and Mechanical Engineering . School of Electrical Engineering , Electronics and Telecommunications . Director: MSc. German Alfonso Osma P.

ABSTRACT

TITLE: OPTIMIZATION OF THE ENERGETIC DESIGN OF HYBRID INTELLIGENT CLIMATIZATION (NATURAL AND MECHANICAL) IN A TROPICAL ENVIRONMENT AS A MODEL SET OF SPECIFIC ENERGY PERFORMANCE*

AUTHORS: CRISTIAN LEONARDO HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, CRISTHIAN DAVID ORDUZ PARRA, ANDRÉS MAURICIO GÓMEZ CARREÑO**

KEYWORDS: optimization, net present value, automatization, RC modelling, hybrid climatization, nonlinear programming, genetic algorithms.

DESCRIPTION: The thermal conditioning of buildings is today one of the essential aspects when performing buildings friendly to the environment, due to the importance of taking advantage of the thermal behavior and environmental factors that allow thermal adaptability conditions. The air conditioning is the best solution that can be given to many of the disagreements that can have a human being in an environment, whether it is commercial, residential or industrial this may be natural, artificial and hybrid. In this particular case hybrid cooling systems are addressed.

To the extent that energy consumption is needed to meet increasing needs for comfort, less efficient will be the climatization system being implemented; for this reason should be noted that it is of great importance to support the improvement of the design of climatization in various parts of the building from an optimization process that seeks the lowest energy consumption and lower financial cost.

This degree work and solves a problem posed optimization that allows for the use of hybrid air conditioning systems for building section used as classrooms. Using three climatization strategies: natural ventilation, forced ventilation and air conditioning, taking into account the characteristics of the resources available in the market and environmental characteristics together with financial and quality parameters for assessing the viability of the system to be implemented.

* Work degree

** School of Physics and Mechanical Engineering . School of Electrical Engineering , Electronics and Telecommunications . Director: MSc. German Alfonso Osma P.

1 INTRODUCCIÓN

El acondicionamiento térmico de edificaciones es hoy en día uno de los aspectos indispensables a la hora de realizar construcciones amigables con el medio ambiente [1]. Los diseños de climatización tradicionales tienden a obviar el entorno exterior y crean un entorno artificial dentro de un espacio ocasionando un consumo significativo de energía [2], esto porque en ciertas ocasiones para los diseñadores es más sencillo crear entornos 100% artificiales y no tienen en cuenta que el ambiente térmico al interior de una vivienda está dado por la relación de equilibrio entre las condiciones de temperatura del aire, y la humedad relativa [3], estas condiciones térmicas son las variables más importantes a considerar en las estrategias de adaptabilidad climática de edificaciones.

La importancia del aprovechamiento del comportamiento térmico y los factores ambientales radica en que a través de estos se pueden observar las condiciones del grado de adaptabilidad térmica. Esto en el entendido que para considerar los sistemas de climatización se deben conocer sus características [4]. En este caso particular se abordaron los sistemas de climatización híbridos.

La literatura existente acerca de sistemas de climatización son estudios realizados principalmente en flujo de aire natural, forzado e híbrido y su aplicación en distintos países europeos, donde no solo se procura analizar el sistema utilizado, sino que también se busca juzgar el comportamiento de la calidad del aire interior.

Estudios demuestran que la ventilación natural y la ventilación cruzada apoyadas en el método chimenea tienen altas tasas de intercambio de aire para todos los escenarios estudiados. Para ventanas con alturas de abertura de tan solo 0,18m el intercambio de aire es en su mayoría lo suficientemente significativo como para proporcionar una buena calidad de aire interior, pero no ofrece ninguna garantía de buenas condiciones de confort térmico en verano. Se determinó también que los sistemas de ventilación natural bien diseñados ahorran entre 13 kWh/m^2 y 44 kWh/m^2 de energía neta por año en los países de estudio [5].

El potencial ahorro energético de la ventilación por extracción mecánica controlada o ventilación forzada en residencias y la influencia de que estos sistemas pueden tener sobre la calidad del aire interior fue investigada a través de dos estrategias

principales que parecen aparentemente opuestas: la recuperación de calor y el control de la demanda de ventilación. La sensibilidad de las estrategias de control a las variaciones ambientales y de usuario se probaron utilizando técnicas de Monte-Carlo. En las condiciones en que se aplicaron, las reducciones en la pérdida de calor (a través de ventilación por extracción) fueron del 25% - 60% dependiendo de la estrategia de control elegido [6].

Para la eficiencia de un sistema híbrido de aire acondicionado en diferentes condiciones climáticas, se observa el comportamiento en estado estable de un sistema en condiciones de verano, variando algunos parámetros climáticos significativos; entre estos: la carga latente del espacio, la humedad relativa interior y exterior. El rendimiento de los sistemas híbridos es comparado con una planta tradicional de aire acondicionado, mostrando cómo los resultados de la simulación revelan que el ahorro de energía puede exceder el 60% cuando la carga latente es alta en las condiciones señaladas de ambiente [7].

En países como Estados Unidos, Reino Unido y Canadá, los sistemas de climatización son la mayor carga de energía en edificaciones; representando entre el 43% y el 60% del consumo de energía residencial dependiendo de la época del año [8]. Gran parte de esta energía se utiliza para climatizar espacios desocupados durante largos periodos de tiempo cuando la gente usa sólo una pequeña fracción del espacio. Por esta razón se separaron por zonas los espacios para explorar la efectividad del uso de sensores y actuadores produciendo un sistema de zonificación a nivel de cada espacio, dando se obtiene como resultado que el sistema consume 20,5% menos energía que un sistema sin zonificar y con un solo termostato existente [8].

El análisis que se desarrolla en el presente trabajo de grado es realizado bajo el enfoque de calor sensible. No se tiene en cuenta el enfoque de calor latente (humedad en el aire), el cual será abordado en un trabajo de investigación posterior.

1.1 DECLARACIÓN DEL PROBLEMA

Debe hacerse notar que es de gran importancia apoyar el mejoramiento del diseño de climatización de diversas zonas de la edificación a partir de un proceso de

optimización que busque el menor costo financiero total, lo cual es el objeto de esta investigación asociada a un proyecto de doctorado el cual representa mediante un “circuito eléctrico” el comportamiento térmico de una sección de edificio donde se consideran aulas de clase [9]. Esto puede ser aplicado para el caso del confort térmico, para lo cual se ha propuesto trabajar a partir de modelos matemáticos a fin de lograr establecer características técnicas que permitan minimizar el consumo energético.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCE

De acuerdo a lo anterior, la investigación propuesta se desarrolló en cuatro (4) etapas: la primera etapa consistió en el reconocimiento del software y en la formulación del modelo de optimización, en la segunda etapa se desarrollaron los programas de simulación computacional empleando GAMS para el caso programación no lineal y MATLAB para la técnica heurística, como tercera etapa se desarrolló un análisis de sensibilidad y el planteamiento de una tendencia bajo el análisis de diferentes métodos de ajuste de curvas con base en los resultados obtenidos que pueden considerarse lineamientos y/o criterios de diseño y la cuarta etapa consistió en recoger y organizar la información para la construcción de este documento que arroja los resultados obtenidos.

1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

La estructura del documento se encuentra constituida de la siguiente manera: en el capítulo 2 se presentan las generalidades donde se tratan los temas del marco teórico para el desarrollo del problemas de optimización y el planteamiento de la climatización híbrida, luego se muestra el modelo circuital de tres espacios de sección de edificio por fachadas y muros para hallar en cada espacio la temperatura interna, por último en este capítulo se esboza el sistema de automatización para hacer el sensado de la presencia en cada espacio y la temperatura interna durante el transcurso del día.

En el capítulo 3 se encuentra el modelo matemático de optimización donde se presenta el modelo de inversión, el modelo de mantenimiento, el modelo para el costo energético y el modelo termodinámico; estos modelos vienen integrados por

ecuaciones del costo económico junto con restricciones para la operación del sistema de climatización.

En los capítulos 4 y 5 se hace la presentación de las características particulares de las técnicas consideradas: programación no lineal y heurística, ya que el problema de optimización se resolverá empleando GAMS para el caso programación no lineal y MATLAB para la técnica heurística; los resultados de las simulaciones son presentados en el capítulo 6.

Adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad y análisis paramétricos con base en los resultados obtenidos, identificando tendencias que se consideran como lineamientos y/o criterios de diseño estos son presentados en el capítulo 7. Por último, se presentan las conclusiones importantes del proyecto de investigación.

2 GENERALIDADES

En esta sección se hace una revisión a las generalidades necesarias para el desarrollo del proyecto de investigación, además se presentan conceptos sobre modelado del circuito y la automatización del proceso de climatización.

2.1 MARCO TEÓRICO

En esta sub sección se hace una revisión de toda la fundamentación teórica necesaria para el desarrollo del proyecto.

2.1.1 MODELADO DE UN SISTEMA FÍSICO

Con el fin de realizar investigaciones de sistemas físicos se ha recurrido a su representación a partir de modelos confiables que los caractericen y que permitan tener una visión clara de la forma como estos se comportan y responden frente a los diferentes estímulos a los que están expuestos [10].

En teoría, se puede definir como sistema físico a una combinación de componentes que se encuentran interconectados y actúan en conjunto, y cuyo objetivo es cumplir con una determinada función u objetivo. Para poder analizar y manipular dichos sistemas, es necesario encontrar una forma de representarlos y que “muestre” las características más relevantes de éstos (modelado del sistema).

Para que un sistema pueda ser representado mediante un modelo, debe cumplir con ciertas propiedades que hacen que sea posible su implementación en la vida real y aseguren la estabilidad de éste [11].

Muchas de las aplicaciones tecnológicas que existen en la actualidad están conformadas por elementos que pueden almacenar energía y otros que tienen la propiedad de disiparla. Debido a esto es necesario que el modelo se ajuste a las características que el sistema posee [12]. Existen modelos que pueden representar las características de almacenamiento y disipación de energía en un sistema físico, entre ellos se encuentra el modelado mediante el uso de una red RC (resistencia y capacitor) [13].

En el caso de los circuitos eléctricos, la capacitancia eléctrica es la propiedad que tienen los cuerpos de mantener una carga eléctrica, siendo el condensador el dispositivo más común que almacena energía de esta forma. Por otra parte, se le denomina resistencia eléctrica a la propiedad que tienen los cuerpos de oponerse al paso de la corriente a su paso por un circuito eléctrico cerrado [14], [15].

En el caso particular del análisis de recintos para aplicaciones de HVAC (*heating, ventilation and air conditioning*) por ejemplo, es muy conveniente implementar el modelado mediante redes RC, debido a que las resistencias y las capacitancias eléctricas pueden representar las características de los materiales que componen dichos lugares [16].

Para que el modelo realmente represente el comportamiento del sistema, es de suma importancia tener en cuenta todas las variables que intervienen en la estructura de dicho sistema y observar cuidadosamente cada elemento de éste, para así obtener su análogo en circuito eléctrico [10].

2.1.2 CLIMATIZACIÓN

Se entiende por climatización al proceso mediante el cual se busca crear condiciones adecuadas de temperatura, humedad y limpieza del aire para la comodidad dentro de los espacios habitados. La climatización puede ser natural y/o artificial, y abarca tres aspectos fundamentales en la construcción de una edificación como los son: la ventilación, la calefacción y la refrigeración [17].

La climatización es la mejor solución que se le puede dar a muchas de las inconformidades que puede tener un ser humano dentro de un ambiente, ya sea este comercial, residencial o industrial. En la actualidad, existen muchas tecnologías disponibles en el mercado para crear sensación de frío o calor (refrigeración y calefacción) [18].

Los sistemas de climatización consumen energía. En la medida en que el consumo energético que se necesita aumenta para satisfacer necesidades de confort en una sección de edificio o espacio de trabajo, menos eficiente va a ser el sistema de climatización que se esté implementando, hablando en términos energéticos, y su impacto sobre el medio ambiente tenderá a aumentar [19].

2.1.3 VENTILACIÓN

La ventilación es la principal estrategia de climatización en los climas cálidos, tanto secos como húmedos. También es empleada en los climas fríos, con el fin de controlar el viento y las infiltraciones. De igual manera, en los climas templados se puede aprovechar intensamente la ventilación en las estaciones de primavera y otoño [20].

Para lograr un adecuado diseño arquitectónico respecto de la ventilación es necesario comprender el comportamiento del viento y la forma en la que pueden aprovecharse los patrones que éste sigue en su recorrido cuando atraviesa las edificaciones [21].

2.1.4 OPTIMIZACIÓN

La mayoría de los problemas en el mundo real tienen varias soluciones y algunos tienen infinitas soluciones. El propósito de la optimización es encontrar o identificar la mejor solución posible, entre todas las soluciones potenciales, para un problema dado en términos de algún o algunos criterios de efectividad o desempeño [22].

Se requiere de un proceso en el que se encuentran las condiciones que llevan a poder minimizar el esfuerzo requerido y/o maximizar el beneficio deseado; el cual se puede expresar como una función en términos de las variables de interés [23].

Debe hacerse notar que no existe un solo método por cual se pueda llegar a este resultado; existen numerosas estrategias de optimización que van desde sofisticados procedimientos matemáticos (tanto analíticos como numéricos) hasta la aplicación de la aritmética [24].

Estas técnicas se pueden dividir en tres grandes grupos: técnicas de programación matemáticas, técnicas de procesos estocásticos y métodos estadísticos. El primer grupo es muy útil para encontrar el mínimo de una función de muchas variables bajo ciertas restricciones preestablecidas; con las técnicas de procesos estocásticos se pueden analizar problemas que se encuentran

descritos por variables aleatorias; finalmente los métodos estadísticos son útiles para analizar datos experimentales y construir modelos empíricos [23].

Otra clasificación general de los métodos de optimización que se puede encontrar es la siguiente: métodos analíticos a través del uso del cálculo diferencial (insuficiente para problemas no lineales), métodos numéricos con algoritmos (procedimientos iterativos) y otros métodos conocidos como gráficos, experimentales y de estudio de casos [25].

Casi siempre el interés en la optimización se centra en la solución de problemas reales, los cuales deben ser representados matemáticamente. Estos representan dos tipos de dificultades: la formulación del modelo matemático dada por la representatividad y función a ser optimizada o función objetivo y la técnica de solución basada en la existencia de varios extremos locales y globales, además, se supone que los coeficientes y variables del modelo (función objetivo) no son variables aleatorias donde se presentan errores de redondeo de la aritmética de punto flotante [24].

2.2 MODELO CIRCUITAL

Para este trabajo de grado se pretende lograr la optimización de un modelo suministrado como resultado de avance de una investigación de doctorado, el cual representa mediante un “circuito eléctrico” el comportamiento térmico de una sección de edificio. Se espera entonces encontrar el conjunto de valores de los componentes que lograrían el menor consumo energético¹.

Se ha considerado que la zona de estudio es un primer piso, donde se analizará el comportamiento térmico de 3 aulas de clase, tal como se muestra en la *Figura 1*. Se considera que la altura de los espacios es uniforme e igual a 2,6 m y que la fachada Este no presenta transferencia de calor debido a un material altamente aislante introducido al interior del muro.

Los espacios 1, 2 y 3 tienen largos (Oeste a Este) de 5, 10 y 16,7 metros, respectivamente; mientras su ancho (Norte a Sur) es de 6 metros. Todas las

¹ “Modelado y optimización del diseño energético de viviendas a partir de aplicaciones URE”. Autor: German Alfonso Osma Pinto. Esta investigación se desarrolla en el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica – GISEL de Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones – E3T en la Universidad Industrial de Santander

ventanas de la fachada sur tienen el mismo tamaño y un área de 2 metros cuadrados (2mX1m), aunque su número varía de acuerdo al espacio, y puede permitir el ingreso de aire sólo por el 50% de su área debido a que sólo la mitad tiene vidriado móvil.

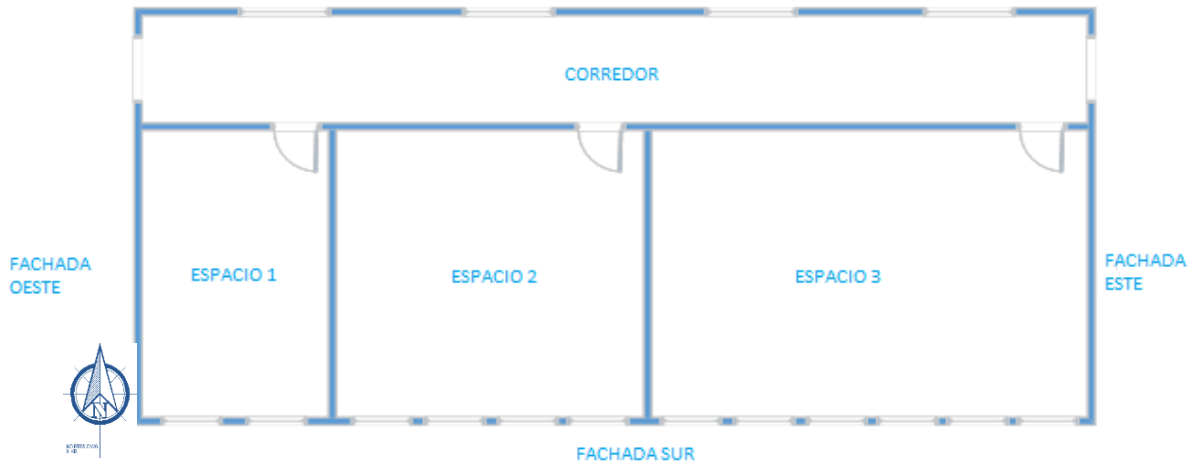


Figura 1. Sección de edificación

Cada espacio cuenta con ventanas al lado opuesto de la puerta para favorecer la ventilación natural, descrito a partir de dos zonas (ver Figura. 2) debido a la no uniformidad de la circulación del aire causada por la ubicación y tamaño de la puerta.

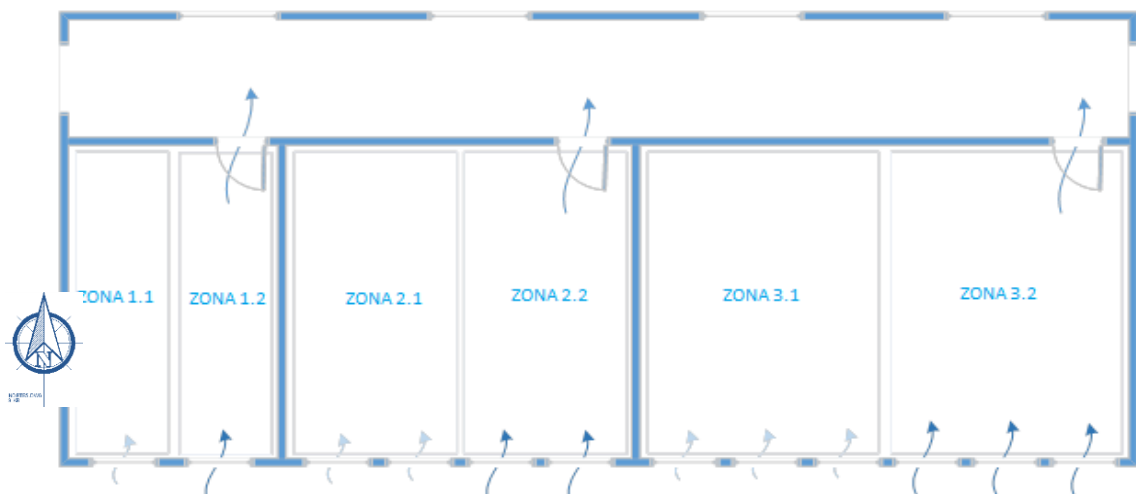


Figura 2. Zonificación de la sección de edificio

A continuación se presentan los modelos de parámetros concentrados de muros exteriores, espacios interiores, muros interiores y piso, a partir de los cuales se

describen los fenómenos de transferencia de calor característicos de cada espacio. En este estudio se considera despreciable la transferencia de calor con el nivel superior.

2.2.1 MODELO TÉRMICO DEL MURO EXTERIOR

Para el planteamiento del modelo térmico del muro exterior se tiene en cuenta que el muro recibe una radiación solar; este a su vez posee una capacidad de almacenamiento térmico y una resistencia térmica que hace que la temperatura dentro y fuera del espacio no sea la misma.

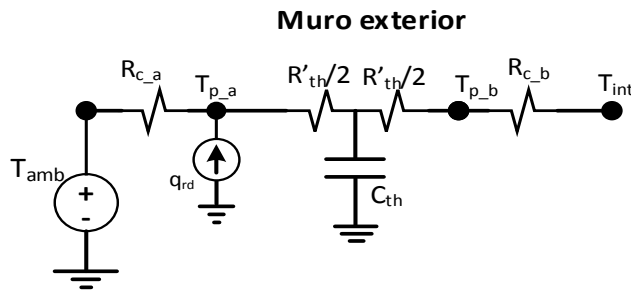


Figura 3. Modelo térmico muro exterior.

Se consideran dos lados (a y b) como se muestra en la Figura 3 y donde las variables del modelo se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables muro exterior

Variable	Descripción
T_{amb}	Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
$R_{c,a}$	Resistencia de convección en el lado a
$T_{p,a}$	Temperatura de pared en el lado a ($^{\circ}C$)
q_{rd}	Radiación solar que ingresa a la pared (calor) (W), y será igual al 35% de la radiación solar difusa incidente sobre la fachada oeste
R'_{th}	Resistencia térmica de estado transitorio. Su valor será 0,75 veces el valor de la resistencia térmica en estado estable
C_{th}	Capacidad térmica de la pared. Su valor será 1,05 veces el valor de la capacidad térmica en estado estable
$T_{p,b}$	Temperatura de pared en el lado b ($^{\circ}C$)
$R_{c,b}$	Resistencia de convección en el lado b
T_{int}	Temperatura del espacio interior ($^{\circ}C$)

2.2.2 MODELO TÉRMICO DEL ESPACIO INTERIOR

Se plantea una división del espacio en dos zonas para observar el modelo. En estas se analiza por separado el calor que suministra el aire entrante, las lámparas, equipos portátiles, personas y demás elementos que proporcionen carga térmica dentro del espacio.

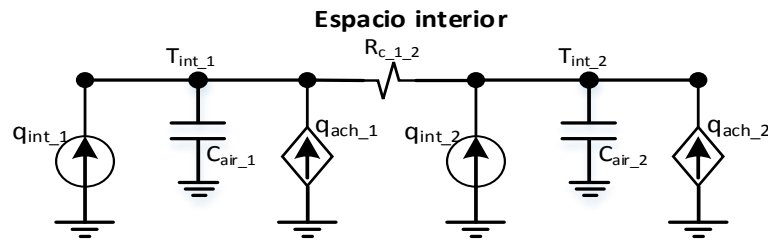


Figura 4. Modelo térmico del espacio interior.

Luego el análisis de cada zona es relacionado a través de una resistencia de convección como se observa en la Figura 4, las variables del modelo térmico se consignan en la Tabla 2.

Tabla 2. Variables espacio interior

Variable	Descripción
q_{int_1}	Calor suministrado por lámparas, portátiles, proyecto y personas en la zona 1 del espacio (W).
T_{int_1}	Temperatura del aire en la zona 1 (°C).
C_{air_1}	Capacidad térmica del volumen de aire de la zona 1 del espacio interior.
q_{ach_1}	Calor suministrado por el aire entrante (W). Considerar que la velocidad del aire que ingresa por las ventanas de la izquierda es 5% de la velocidad del aire presente en el lugar.
$R_{c_1_2}$	Resistencia de convección entre los lados 1 y 2.
q_{int_2}	Calor suministrado por lámparas, portátiles, proyecto y personas en la zona 2 del espacio (W).
T_{int_2}	Temperatura del aire en la zona 2 (°C).
C_{air_2}	Capacidad térmica del volumen de aire de la zona 2 del espacio interior.
q_{ach_2}	Calor suministrado por el aire entrante en la zona 2 del espacio interior (W). Considerar que la velocidad del aire que ingresa por las ventanas de la derecha es 8% de la velocidad del aire presente en el lugar.

Calculando q_{ach_2}

$$q_{ach} = m' * C_{aire} * (T_i - T_{zone}) \quad Ec. 2. 1$$

Donde:

m' , representa el flujo de masa del aire expresada en kg/h.

C_{aire} , representa el calor específico del aire expresada en J/kg*°C.

T_i , temperatura del flujo de aire entrante (T_{amb}) expresada en °C.

T_{zone} , temperatura del flujo de aire saliente. Será la misma temperatura de la zona analizada expresada en °C.

V' , flujo de aire expresado en m³/s o m³/h.

ρ , densidad del aire expresada en kg/m³.

A , área de la abertura expresada en m². Es el área de apertura de la ventana.

v , velocidad del aire expresada en m/s.

$$m' = V' * \rho \quad Ec. 2. 2$$

$$V' = A * v \quad Ec. 2. 3$$

2.2.3 MODELO TÉRMICO DEL MURO INTERIOR

Es el muro que separa los espacios como se muestra en la *Figura 5*. Se plantea un análisis por separado para cada lado de la pared teniendo en cuenta la resistencia y la capacidad térmica del material.

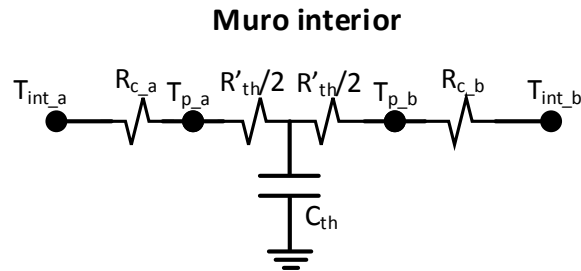


Figura 5. Modelo térmico muro interior.

Se observa el comportamiento de la temperatura del aire y se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Variables muro interior

Variable	Descripción
$T_{int,a}$	Temperatura del aire en la zona a (°C)
$R_{c,a}$	Resistencia de convección de la zona a .
$T_{p,a}$	Temperatura de la pared de la zona a (°C).
R'_{th}	Resistencia térmica de estado transitorio. Su valor será 0,95 veces el valor de la resistencia térmica en estado estable.
C_{th}	Capacidad térmica de la pared. Su valor será 1,05 veces el valor de la capacidad térmica en estado estable.
$T_{p,b}$	Temperatura de la pared de la zona b (°C).
$R_{c,b}$	Resistencia de convección de la zona b .
$T_{int,b}$	Temperatura del aire en la zona b (°C).

2.2.4 MODELO TÉRMICO DEL SUELO (PRIMER NIVEL)

En este modelo se tiene en cuenta la interacción térmica que existe entre cada espacio y el suelo, dicha interacción está representada por una resistencia de convección y una temperatura de suela como se muestra en la *Figura 6*.

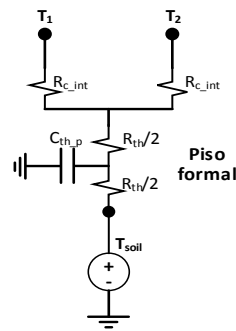


Figura 6. Modelo térmico del piso

Las variables presentes en el modelo térmico se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Variables modelo térmico del piso.

Variable	Descripción
T_1	Temperatura del aire de la zona 1 ($^{\circ}\text{C}$).
T_2	Temperatura del aire de la zona 2 ($^{\circ}\text{C}$).
R_{c_int}	Resistencia de convección del espacio interior a nivel de piso.
R'_{th}	Resistencia térmica de estado transitorio. Su valor será 0,95 veces el valor de la resistencia térmica en estado estable.
C_{th_p}	Capacidad térmica del piso. Su valor será 0,96 veces el valor de la capacidad térmica en estado estable.
T_{soil}	Temperatura del suelo ($^{\circ}\text{C}$)

2.2.5 MODELO TÉRMICO DE LA FACHADA SUR

En esta fachada es necesario tener en cuenta cómo influyen las ventanas en la radiación que ingresa a los diferentes espacios; debido a que se considera que estas permiten el ingreso de aire solo en el 50% de su área, es necesario analizar cada mitad por separado como se muestra en la Figura 7.

- Parte abierta: como la radiación llega plena al espacio interior, es decir, sin ninguna obstrucción, se representa con una fuente independiente de

corriente que está conectada al nodo “Tint” (temperatura interior) directamente.

- Parte cerrada: esta parte está compuesta por vidrio y se considera despreciable la acumulación de calor en este, sin embargo hay que tener en cuenta un factor de atenuación del material que no permite el ingreso del 100% de la radiación.

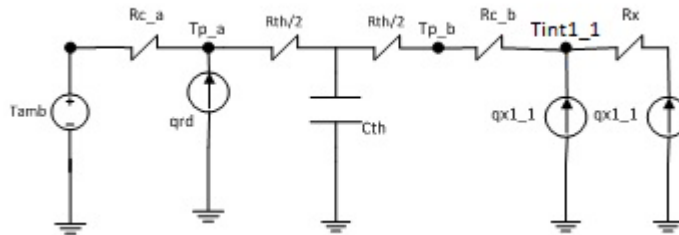


Figura 7. Modelo térmico fachada sur.

Las variables involucradas en el modelo térmico de la fachada sur se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Variables modelo térmico fachada sur.

Variable	Descripción
T_{amb}	Temperatura ambiente ($^{\circ}C$).
R_{c_a}	Resistencia de convección en el lado a .
T_{p_a}	Temperatura de pared en el lado a ($^{\circ}C$).
R'_{th}	Resistencia térmica de estado transitorio. Su valor será 0,95 veces el valor de la resistencia térmica en estado estable.
q_{rd}	Radiación solar que ingresa a la pared (calor) (W), y será igual al 35% de la radiación solar difusa incidente sobre la fachada oeste.
C_{th}	Capacidad térmica de la pared. Su valor será 1,05 veces el valor de la capacidad térmica en estado estable.
T_{p_b}	Temperatura de pared en el lado b ($^{\circ}C$).
R_{c_b}	Resistencia de convección en el lado b .
T_{int}	Temperatura del espacio interior ($^{\circ}C$).
q_x	Radiación solar que ingresa al espacio.
R_x	Resistencia de factor de transmitancia del vidrio.

2.2.6 MODELO TÉRMICO DE LA FACHADA NORTE

En esta fachada es necesario tener en cuenta que el aporte térmico de la puerta ya está considerado en los anteriores sub modelos como las fuentes dependientes Q_{ach_1} y Q_{ach_2} .

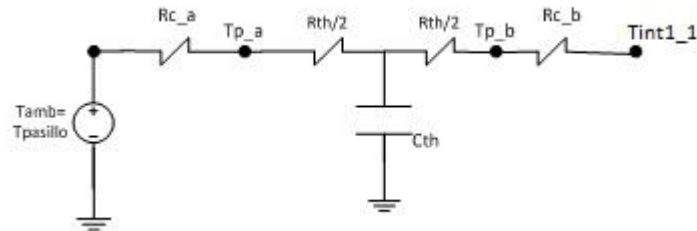


Figura 8. Modelo térmico fachada norte

Se asume la temperatura del pasillo como temperatura ambiente (ver Tabla 6), debido a esto lo restante de la fachada norte se puede considerar como el modelo del muro interior como se puede observar en la Figura 8.

Tabla 6. Variables modelo térmico fachada norte.

Variable	Descripción
R_{c_a}	Resistencia de convección en el lado a .
T_{p_a}	Temperatura de pared en el lado a (°C).
R'_{th}	Resistencia térmica de estado transitorio. Su valor será 0,95 veces el valor de la resistencia térmica en estado estable.
T_{int_a}	Temperatura del aire en la zona a (°C).
C_{th}	Capacidad térmica de la pared. Su valor será 1,05 veces el valor de la capacidad térmica en estado estable.
T_{p_b}	Temperatura de pared en el lado b (°C).
R_{c_b}	Resistencia de convección en el lado b .
T_{int_b}	Temperatura del aire en la zona b (°C).

Los circuitos de cada espacio por completo son presentados en el Anexo A apartado A.1.1.

En las tablas 7 y 8 se presentan algunos valores a tener en cuenta para hallar las variables de cada modelo térmico, los valores faltantes como la radiación solar, la actividad de presencia en cada espacio durante las 24 horas del día, la temperatura ambiente, la carga térmica de cada espacio y los datos de velocidad del viento, son presentados en el anexo A apartado A.1.2. Algunos de estos datos son necesarios también para el planteamiento del modelo para menor costo financiero del problema de optimización.

- Resistencia térmica: $R = M/K$;

Donde K representa la conductividad térmica del material y M el espesor de la capa de material expresado en metros.

Tabla 7. Valores de resistencia térmica según material.

		$\frac{W}{m * ^\circ K}$	M [m]	$\frac{^\circ K * m^2}{W}$
	Material	K	Espesor	R. Térmica
Pared	Ladrillo	0,658	0,15	0,22796353
Pared	Drywall	0,41	0,1	0,24390244
Placa	Concreto A.	0,28	0,4	1,42857143
Piso	Concreto	1,18	0,05	0,04237288

- Densidad del aire $D = \frac{P}{R*T}$

Debido a las condiciones de ambiente interior y exterior, la temperatura del espacio puede variar y por ende la densidad. Por esta razón es conveniente indicar que se consideró un valor de presión constante y de acuerdo al perfil de temperatura ambiente para 24 horas se logró obtener el valor de la densidad del aire a lo largo del día.

Tabla 8. Cálculo densidad del aire

Presión	Cte. Gas	Temperatura	Densidad
P [J/m ³]	R [J/(kg*K)]	T [°K]	D [kg/m ³]
1000	287,05	300	0,01161238

- Transmitancia de vidrio claro

Este factor se establece debido que es preciso conocer la cantidad de energía que atraviesa la superficie del vidrio en la unidad de tiempo.

$$\text{Transmitancia} = 5,7 \left[\frac{W}{(m^2 * ^\circ K)} \right]$$

2.3 TEMPERATURA INTERIOR A TRAVÉS DEL MODELO CIRCUITAL

Reemplazando los valores de las resistencias, condensadores y fuentes de corriente se encuentra el valor de la temperatura interna en cada espacio. Los valores reemplazados fueron tomados de las tablas 7 y 8 y de las tablas que hacen parte del Anexo A apartado A1.2. El modelo del circuito fue simulado en el software *OrCAD Capture*.

Debido a que las condiciones internas y externas a los espacios cambian cada hora, los parámetros de los circuitos eléctricos tomarán valores diferentes durante cada hora del día. Para efectos de simulación, a continuación se muestra el análisis de la temperatura interior para cada espacio considerando la hora del día de 3 pm a 4 pm. Se considera que los muros exteriores son de ladrillo y los muros interiores de *drywall*.

- TEMPERATURA INTERIOR DEL ESPACIO 1.

El espacio uno (1), está dividido en dos zonas para un análisis más exhaustivo del espacio, por tal razón en la *Figura 9* se observan las temperaturas *Tint11* y *Tint12* que hacen referencia al espacio uno (1) zona uno (1) y del espacio uno (1) zona dos (2), respectivamente.

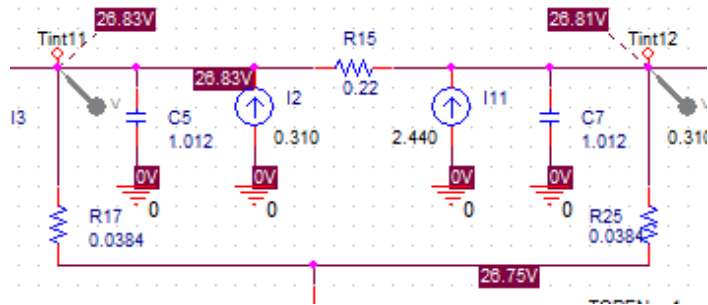


Figura 11. Temperatura interior del espacio 1 de 3-4 pm.

En el horario comprendido entre las 3 y las 4 de la tarde, en el espacio 1 zona 1 se obtiene una temperatura $Tint11$ de 26,83 °C y para el espacio 1 zona 2 una temperatura $Tint12$ de 26,81 °C, configurando una temperatura interior del espacio de 26,82 °C. Esto se puede observar en la Figura 11.

- TEMPERATURA INTERIOR DEL ESPACIO 2

El espacio dos posee dos (2) ventanas en cada zona, cuenta con una mayor capacidad de personas y posee equipos de cómputo, por esta razón la carga térmica es mayor que la que se tiene en el espacio anterior. El circuito eléctrico que representa el espacio 2 se muestra en la Figura 12.

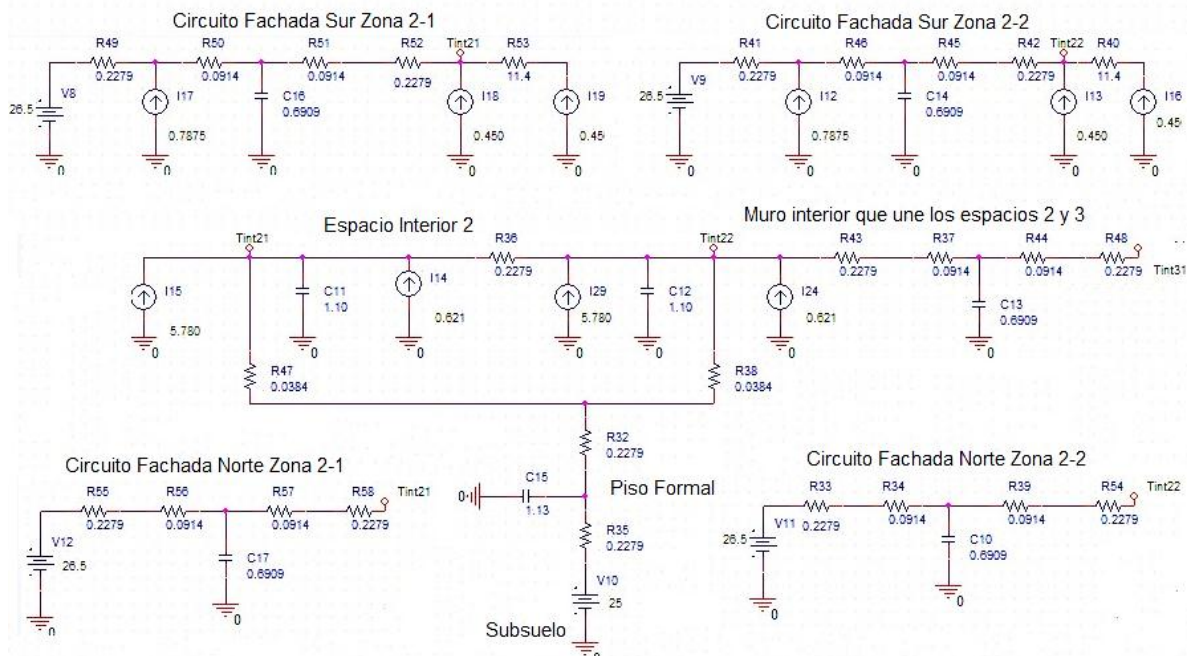


Figura 12. Circuito equivalente para hallar la temperatura interior del espacio 2.

El espacio 2 está dividido en dos zonas (zona 1 y 2) para inspeccionar de mejor manera el comportamiento térmico de las temperaturas $Tint21$ y $Tint22$, como se presentan en las *Figura 13*, donde se analiza la franja horaria de 8-9 am.

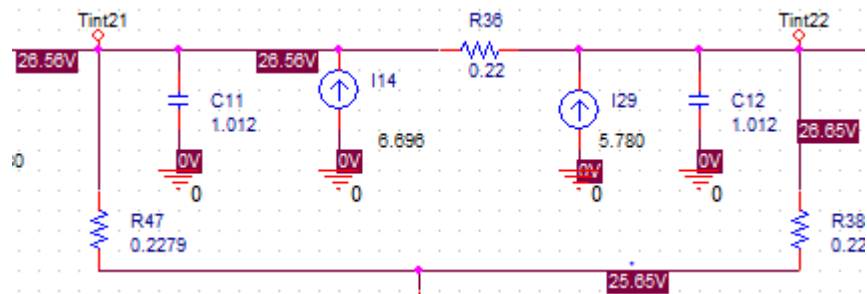


Figura 13. Temperatura interior del espacio 2 de 8-9 am.

En la *Figura 14* se muestra el valor de la temperatura en el espacio 2, para el horario de 3-4 pm.

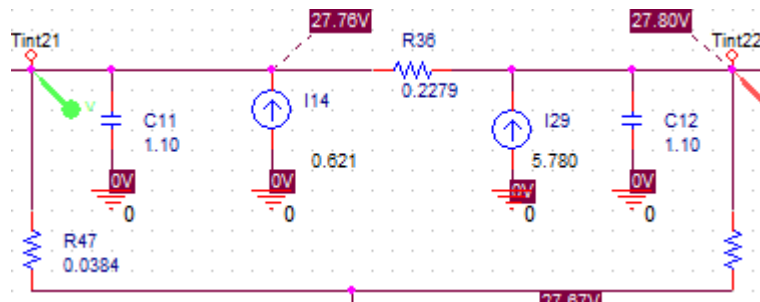


Figura 14. Temperatura interior del espacio 2 de 3-4 pm.

Para el espacio 2 zona 1 se obtiene una temperatura $Tint21$ de 27,76 °C y para el espacio 2 zona 2 una temperatura $Tint22$ de 27,80 °C, configurando una temperatura interior del espacio de 27,78 °C.

- TEMPERATURA INTERIOR DEL ESPACIO 3

El espacio tres posee dos (3) ventanas en cada zona, cuenta con una mayor capacidad de personas y posee equipos de cómputo, por esta razón la carga térmica es mayor, obteniendo así una temperatura interior mayor a la de los espacios 1 y 2. El circuito eléctrico que representa el espacio 3 se muestra en la *Figura 13*.

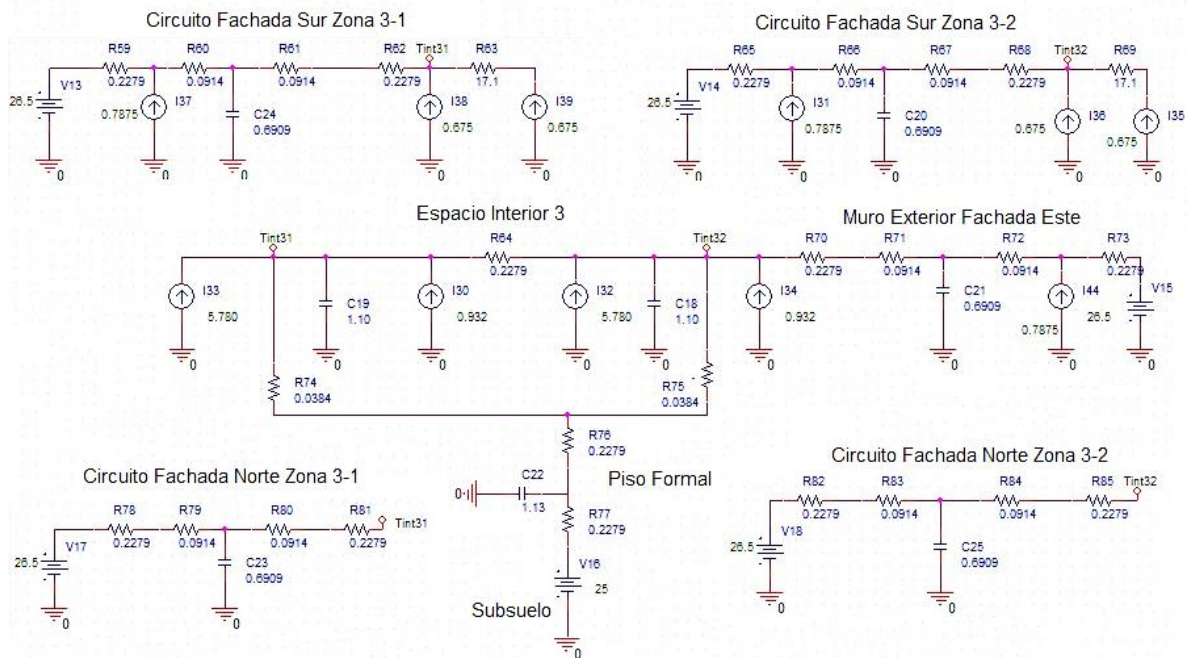


Figura 15. Circuito equivalente para hallar la temperatura interior del espacio 3

El espacio 3 al igual que los espacios anteriores está dividido en dos zonas para inspeccionar de mejor manera el comportamiento térmico. La temperatura T_{int31} y T_{int32} se presenta en las Figura 16, donde se aprecia que en el horario entre las 8 y las 9 de la mañana el espacio se encuentra a una temperatura de 26,6 °C.

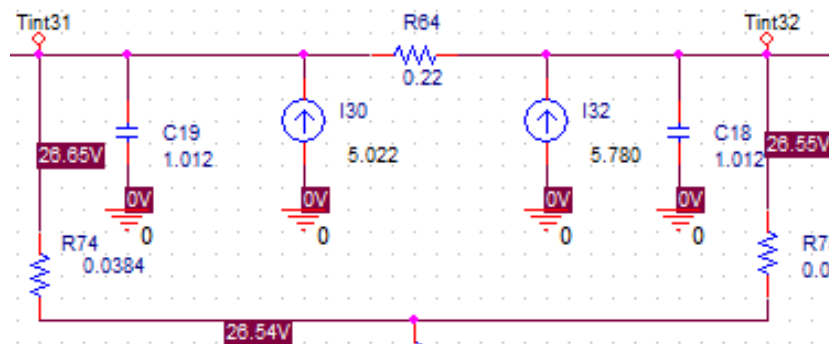


Figura 16. Temperatura interior del espacio 3 de 8-9 am.

En el horario comprendido entre las 3 y las 4 de la tarde, como se muestra en la Figura 17, la zona 1 se encuentra a una temperatura T_{int31} de 27,90 °C y la zona 2 a una temperatura T_{int32} de 27,86 °C, configurando una temperatura interior del espacio de alrededor 27,88 °C.

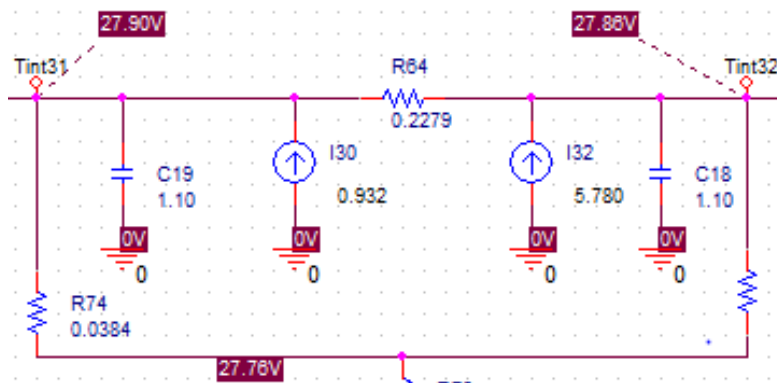


Figura 17. Temperatura interior del espacio 3 de 3-4 pm.

El anterior análisis es de importancia debido a que con él se muestra que las temperaturas dentro de cada uno de los espacios se encuentran por encima del valor considerado de confort térmico y evidencia la necesidad de implementar estrategias de climatización al interior de cada uno para lograr llevar dichas temperaturas a los valores adecuados para lograr el confort deseado.

2.4 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN

El sistema de automatización considera tres tipos de soluciones para resolver el problema de climatización (confort térmico) de un espacio en particular: ventilación natural (NV), ventilación forzada asistida por extractores (FV) y aire acondicionado (AA) que puede ser independiente o de unidad central.

Para esto se hace necesaria la medición de la temperatura al interior y al exterior de dicho espacio, además de poder conocer el perfil de ocupación del espacio. Este trabajo se realiza usando sensores de presencia al interior de cada espacio, sensores de temperatura dentro y fuera de cada espacio y detectores de apertura para puertas y ventanas.

Algunas consideraciones que se tienen en cuenta para el correcto funcionamiento del sistema son las siguientes:

- Mientras no se detecte presencia en el espacio no se utiliza ninguna de las tres soluciones.

- Sólo es posible el uso de una de las tres soluciones a la vez (ventilación natural, ventilación forzada o aire acondicionado) aunque las tres pueden estar presentes en cada espacio.
- Se considera que la temperatura de confort térmico es de 25,5°C.
- El sistema de automatización funciona en el horario de 6 a.m. a 9 p.m., pero el estudio se realiza para las 24 horas del día para que este pueda ser aplicado en otros casos.
- El sistema de automatización realiza las mediciones de temperatura a intervalos de una hora (cambio en la presencia de cada espacio).

Para describir el funcionamiento del sistema de automatización, se consideran cuatro variables: presencia en el espacio, temperatura interior (T_{int}), temperatura de confort ($T_{confort}$) y temperatura ambiente (T_{amb}), las cuales pueden presentarse al interior y al exterior de cada espacio.



Figura 18. Esquema del controlador

La operación de las tres estrategias posibles de climatización de los espacios se describe a partir del flujograma de la *Figura 19*, la cual estará a cargo de un controlador (ver *Figura 18*). Para efectos prácticos de simulación, este flujograma debe ser corrido cada vez que se haga una iteración en el circuito representativo establecido.

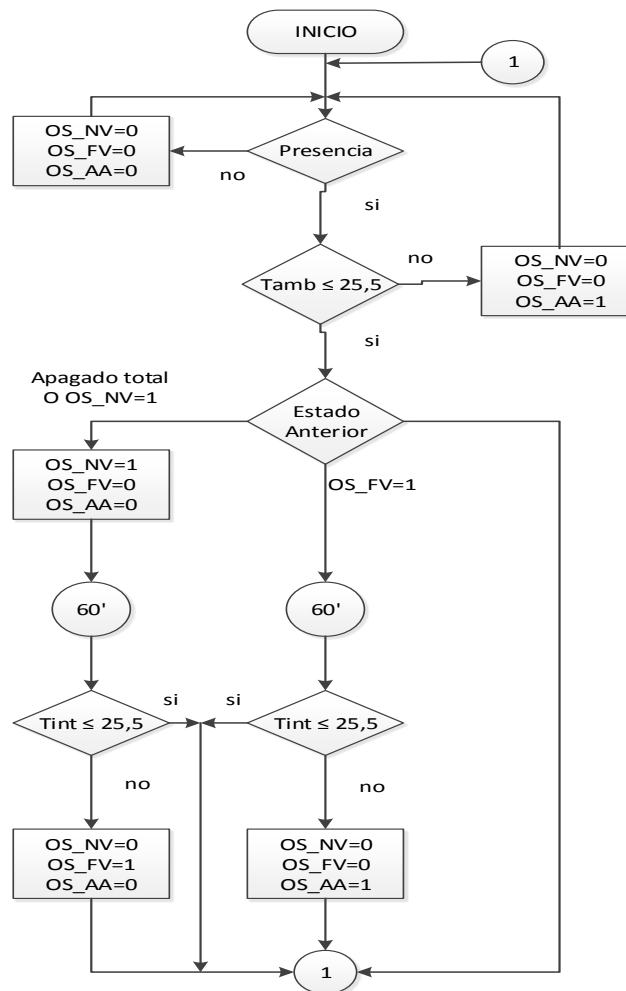


Figura 19. Flujograma de operación de las estrategias de climatización.

El sistema de automatización encargado de mantener la temperatura interior de cada espacio dentro de los límites permitidos realiza un sensado de las variables de entrada a intervalos de una hora y de acuerdo a esta lectura ejecuta una acción, tal como se muestra en la *Figura 19*.

2.4.1 OPERACIÓN INTERNA DEL AIRE ACONDICIONADO

La operación efectiva del aire acondicionado en cada espacio depende de dos variables. La primera es determinada con base en el comportamiento térmico y se representa como $OS_{AA}_{1,th}$ la segunda depende directamente del aire acondicionado y se basa en la temperatura del aire que éste establece y que se

representa desde ahora como *State AA*. La *State AA* está exclusivamente asociada con el consumo energético variable del aire acondicionado. Cuando está en *On* el consumo energético es 100% (variable + fijo) y cuando está en *Off* el consumo energético es solo fijo.

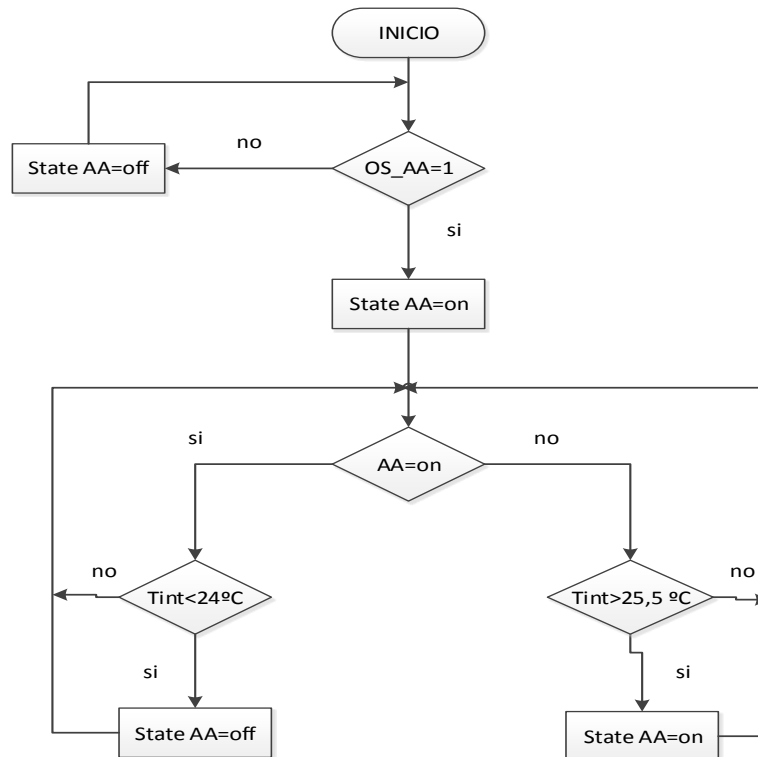


Figura 20. Diagrama de flujo para determinar el valor de A.A.

En la *Figura 20* se presenta el diagrama de flujo para determinar el valor de *State AA* según la temperatura interior sensada directamente por aire acondicionado (usan termostatos). Cuando se da la orden de encendido a través de $OS_AA_{1,th}$, la variable *State AA* toma el valor de *On* y se mantendrá a menos que la temperatura descienda por debajo del límite inferior de operación, por ejemplo 24°C , momento en el que el aire acondicionado quedará en *Stand-by* ($State AA = off$), esto se pregunta en la acción que esta denominada como *AA*.

En este escenario las ganancias térmicas incrementarán la temperatura del aire, si tal incremento supera el límite superior entonces *State AA* pasará a *On*. Tal como se describe en el flujograma, el aire acondicionado se apagará solamente cuando la variable $OS_AA_{1,th}$ así lo determine.

La Tabla 9 muestra la representación de cada estrategia de climatización junto con sus actuadores y la ecuación indicada para calcular su valor.

Tabla 9. Representación de las estrategias de climatización consideradas.

ESTRATEGIA	VENTILACIÓN NATURAL	VENTILACIÓN FORZADA	AIRE ACONDICIONADO
REPRESENTACIÓN			
ECUACIÓN	$q_{ach} = m' * C_{aire} * \Delta T$	$q_{ach} = m' * C_{aire} * \Delta T$	$q_{AA} = CapAAI * \gamma$ $\gamma = 3517[W/TR]$
REPRESENTACIÓN DEL ACTUADOR			

3 PRESENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN

El planteamiento de un problema de optimización debe equilibrar dos características esenciales en el modelo: la precisión en construir un modelo que describa apropiadamente el problema y la simplicidad en construir un modelo tratable, que se pueda resolver mediante alguna técnica de resolución.

En un problema de optimización se pueden presentar diversos problemas como lo son: la formulación del modelo matemático (representatividad) y la técnica de solución considerando la existencia de varios extremos globales y locales, la suposición de los coeficientes y variables del modelo como variables determinísticas y los errores de redondeo de la aritmética punto flotante

Formalmente lo que se busca es maximizar o minimizar la función objetivo f en el espacio factible de solución,

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n).$$

Que depende de,

$$H_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0; \quad k = 1, 2, 3 \dots, k \quad \text{Restricciones de igualdad.}$$

$$G_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq 0; \quad k = 1, 2, 3 \dots, k \quad \text{Restricciones de desigualdad.}$$

$$x_k^l \leq x_k \leq x_k^v; \quad k = 1, 2, 3 \dots, k \quad \text{Restricciones de desigualdad.}$$

La región factible es el conjunto de valores de las variables independientes que satisfacen simultáneamente las restricciones de igualdad y de desigualdad. Así por ejemplo, las condiciones de igualdad solo se satisfacen en una curva, en el caso de que se trate solamente dos variables y, obviamente, pueda representarse en el plano. Para el mismo caso una condición de desigualdad, separa al plano en 2 zonas, una de valores factibles y la otra de valores no factibles. La *Figura 21* muestra un diagrama que presenta la región factible de un problema de optimización de dos variables.

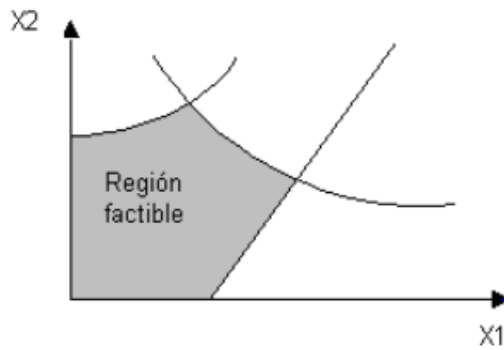


Figura 21. Región factible de un problema de optimización.

El problema de optimización del costo financiero se basa en minimizar la función objetivo *VPN* (valor presente neto) que se pueda obtener en el momento $t=0$. El *VPN* es un índice financiero que permite evaluar alternativas con base en el comportamiento de los flujos financieros para un horizonte de tiempo determinado a una tasa de interés determinada [22].

En la *Figura 22* se aprecian los diagramas de flujos financieros para dos proyectos, A y B, donde el primero, en comparación con el segundo, tiene una mayor inversión inicial y posteriormente unos flujos reducidos a partir del año 1, los cuales no son constantes y se deben calcular año a año.

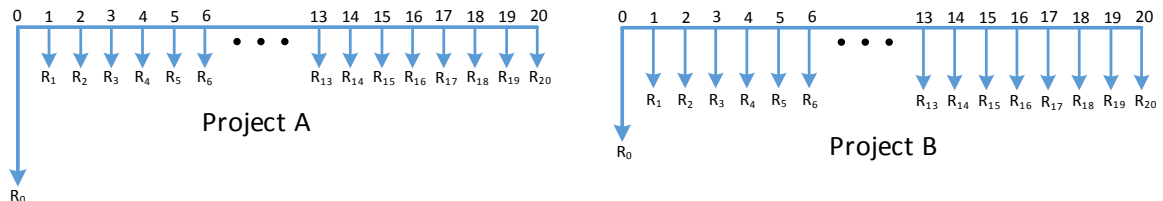


Figura 22. Diagramas de flujo financiero.

Como se puede apreciar de forma directa, este tipo de proyectos no generan ganancias financieras ya que en ningún momento hay flujos positivos, por tanto son proyectos de inversión sin utilidad aparente para el inversionista. Este análisis se plantea para un periodo de 20 años y se busca reducir el costo financiero para el inversionista, por lo que se requiere realizar un proceso de optimización.

Se presenta el modelo teniendo en cuenta la inversión inicial, el costo de operación, el costo de mantenimiento del sistema considerando que se refiere a

inversión y no se reciben para este tipo de proyectos ganancias financieras. Los valores manejados para precios de consumo energético, mantenimiento e inversión están dados en COP (Pesos colombianos).

$$FO = VPN(i, N) = -R_0 + \sum_{t=1}^N \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad Ec. 3.1$$

t , tiempo de flujo de caja (años).

i , tasa de descuento (tasa de retorno).

R_t , flujo neto de efectivo (entrada de efectivo Cin que es igual a cero (0) menos la salida de caja $Cout$) en un tiempo t .

R_0 , inversión

$$R_t = Cin_t - Cout_t \quad Ec. 3.2$$

De donde

$$Cout_t = Cop_t - Cmn_t \quad Ec. 3.3$$

Entonces:

$$R_t = -Cop_t - Cmn_t \quad Ec. 3.4$$

Cop_t , Costo de la energía en función del consumo.

Cmn_t , Costo del mantenimiento durante el tiempo.

Los costos de energía y de mantenimiento se tienen en cuenta para extractores y aires acondicionados tanto independientes como con unidad central, para los sensores de temperatura, sensores de presencia y detectores de apertura el consumo de potencia se considera despreciable, debido que es bajo en comparación con la consumida por los dispositivos de actuación del sistema (aires acondicionados y extractores).

3.1 INVERSIÓN

Para el análisis de la inversión R_0 se definen las ecuaciones que relacionan las variables que influyen en los diferentes costos, mediante el análisis respectivo para cada componente del sistema, considerando como posibles soluciones las cuales no son excluyentes: ventilación natural, ventilación forzada y aires acondicionados (independientes o con unidades centrales).

$$R_0 = I_{ext} + I_{AAI} + I_{UCAA} + I_{SP} + I_{DA} + I_{ST} \quad Ec. 3.5$$

I_{ext} , Inversión en extractores

I_{AAI}_i , Inversión inicial en aires acondicionados independientes en el espacio i.

I_{UCAA}_{ij} , Inversión inicial de unidad central de AA para los espacios ij.

I_{SP} , Inversión inicial sensores de presencia.

I_{DA} , Inversión inicial en detectores de apertura.

I_{ST} , Inversión inicial en sensores de temperatura.

3.1.1 INVERSIÓN EN EXTRACTORES

Para analizar la inversión en extractores se debe tener en cuenta el caudal por hora, este es diferenciado según la potencia del extractor y su costo que en el caso de la tabla 10 está en millones de pesos.

Tabla 10. Costo de los extractores de acuerdo a su capacidad y caudal.

Capacidad (W)	66	115	150
Caudal por hora (m ³)	580	880	1100
Costo (M\$)	1,067	1,382	1,890

De acuerdo a lo anterior, se determina la Ecuación 3.6, donde se observa cada espacio por separado, los cuales a su vez son separados en zonas permitiendo un estudio más detallado de las condiciones térmicas.

$$I_{ext} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 N_{ex_{ij}} \cdot CU_{ex}(P_{ex_{ij}}) \quad Ec. 3.6$$

$N_{ex_{ij}}$, Número de extractores de la zona j del espacio i.

CU_{ex} , Costo unitario extractor según potencia del equipo.

$P_{ex_{ij}}$, Potencia de extractor de la zona j del espacio i.

3.1.2 INVERSIÓN EN INSTRUMENTACIÓN

Dentro del planteamiento del problema de optimización, se tienen en cuenta los costos generados por la instrumentación electrónica necesaria para que el sistema de automatización funcione. Como se mencionó en el planteamiento del problema de optimización, el consumo de potencia de la instrumentación se considera despreciable, debido que es bajo en comparación con la consumida por los dispositivos de actuación del sistema (aires acondicionados y extractores).

En el Anexo B apartado B.1 se hace una comparación del costo y las especificaciones técnicas de los sensores y detectores de apertura que se tuvieron en cuenta para la escogencia final y el diseño de la aplicación HVAC.

- SENSORES DE PRESENCIA

$$ISP = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 N_{SP_{ij}} \cdot CSP_{ij} \quad Ec. 3.7$$

ISP , inversión de sensores de presencia del espacio i.

$N_{SP_{ij}}$, número de sensores de presencia de la zona j del espacio i

CSP_{ij} , costo de sensores de presencia de la zona j del espacio i

- SENSORES DE TEMPERATURA

$$IST = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 NST_{ij} \cdot CST_{ij} \quad Ec. 3.8$$

IST , inversión de sensores de temperatura del espacio i .

NST_{ij} , número de sensores de temperatura de la zona j del espacio i

CST_{ij} , costo de sensores de temperatura de la zona j del espacio i

- DETECTORES DE APERTURA

$$IDA = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 NDA_{ij} \cdot CDA_{ij} \quad Ec. 3.9$$

IDA , Inversión de sensores de detectores de apertura del espacio i .

NDA_{ij} , Número de detectores de apertura de la zona j del espacio i .

CDA_{ij} , Costo de detectores de apertura de la zona j del espacio i .

Se considera que la vida útil de los dispositivos es lo suficientemente larga para abarcar el tiempo de estudio.

3.1.3 INVERSIÓN EN AIRES ACONDICIONADOS INDEPENDIENTES

Se toman como referencias a analizar distintas opciones de aires acondicionados independientes que hay en el mercado, tomando como variable las toneladas de refrigeración que proporciona cada elemento ($CapAAI_i$).

$$CapAAI_i = 0, 2, 3, 3.58 \text{ o } 4 \text{ TR}$$

Ahora, se debe tener en cuenta que para que un aire acondicionado sea apropiado para un espacio, este debe superar la capacidad mínima de refrigeración que necesita el espacio, entonces se plantean las siguientes restricciones para la utilización de aire acondicionado independiente en cada espacio.

$$CapAAI_1 \geq CapAAI_{min_1} \quad Ec. 3.10$$

$$CapAAI_2 \geq CapAAImin_2 \quad Ec. 3. 11$$

$$CapAAI_3 \geq CapAAImin_3 \quad Ec. 3.12$$

La capacidad mínima ($CapAAImin_i$) por espacio se determina mediante:

$$CapAAmin_i = 0,0214V_i + 0,06Np_i \quad Ec. 3. 13$$

Donde, V es el volumen del espacio dado en m^3 y Np representa al número de personas presentes en el espacio. Para el espacio 1 la capacidad mínima es de 2,8692 TR, para el espacio 2 es de 5,7384 TR y para el espacio 3 es de 9,1751 TR; sumando entre los tres espacios una capacidad mínima de 17,7827 TR.

Se plantea la tabla 11 para relacionar la capacidad en toneladas de refrigeración y el costo de inversión de cada referencia de aire acondicionado independiente por aula (CAAI).

Tabla 11. Costo de aire acondicionado independiente por aula

Capacidad (TR)	2	3	3,58	4
Costo (M\$)	6,046	7,696	8,012	8,913

La comparación y elección de los distintos aires acondicionados se explican con detenimiento en el Anexo B apartado B.2.

Se propone la Ecuación 3.14 como representación de la inversión en aire acondicionado independiente por espacio.

$$IAAI_i = NAAI_i \cdot CUAAI(CapAAI_i) \quad Ec. 3. 14$$

$IAAI_i$, Inversión en aire acondicionado independiente para el espacio i

$NAAI_i$, Numero de aires acondicionados independientes para el espacio i .

$CUAAI$, Costo unitario de las unidades de aire acondicionado del espacio i , depende de $CapAAI_i$ que es la capacidad del equipo de aire acondicionado independiente que necesita cada espacio.

3.1.4 INVERSIÓN EN AIRES ACONDICIONADOS CON UNIDAD CENTRAL

Se analizan los posibles valores de capacidad de unidad central de aire acondicionado $CapUCAA$, tomando como variable las toneladas de refrigeración que proporciona cada referencia.

$$CapUCAA_{ij \text{ o } ijk} = 0, 10, 15 \text{ o } 20 \text{ TR}$$

Para determinar que una unidad central de aire acondicionado sea apropiada para un espacio, esta debe superar la capacidad mínima de refrigeración que necesita el espacio, se realiza el siguiente análisis para cada combinación de espacios.

$$CapUCAA_{12} \geq CapAAmin_1 + CapAAmin_2 \quad Ec. 3. 15$$

$$CapUCAA_{23} \geq CapAAmin_2 + CapAAmin_3 \quad Ec. 3. 16$$

$$CapUCAA_{13} \geq CapAAmin_1 + CapAAmin_3 \quad Ec. 3. 17$$

$$CapUCAA_{123} \geq CapAAmin_1 + CapAAmin_2 + CapAAmin_3 \quad Ec. 3. 18$$

Se plantea la Tabla 12 para relacionar la capacidad en toneladas de refrigeración y el costo de inversión de cada unidad central de aire acondicionado $CUAA$.

Tabla 12. Costo de unidades centrales de aire acondicionado.

Capacidad (TR)	10	15	20
Costo (M\$)	36,321	46,491	55,674

El análisis de las unidades centrales de aire acondicionado de la Tabla 12 por el cual se toman estos precios de referencia se presenta en el Anexo B, apartado B.2.

Se formula la siguiente ecuación como representación de la inversión de la unidad central de aire acondicionado.

$$I_UCAA_{ij\ o\ ijk} = C_UCAA(CapUCAA_{ij\ o\ ijk}) \quad Ec. 3. 19$$

I_UCAA , inversión inicial de unidad central de aire acondicionado para los espacios.

C_UCAA , costo unidad central de aire acondicionado, está depende de $CapUCAA$ que es la capacidad la unidad central de aire acondicionado.

3.2 COSTO DEL CONSUMO ENERGÉTICO

Para hallar el flujo neto de efectivo (R_t) se deben tener en cuenta consideraciones como: la entrada de efectivo $Cin_t = 0$ ya que no se reciben beneficios y se tiene en cuenta el valor del costo unitario variable (CUV) que es el costo del kWh que proviene de la fórmula tarifaria que se evidencia en la factura de energía con unidades $\frac{\$}{kWh}$ y que para efectos de análisis tiene una valor constante durante el tiempo de estudio equivalente a 400 \$/KWh.

3.2.1 COSTO DEL CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL POR EXTRACTORES Y UNIDADES DE AIRE ACONDICIONADO INDEPENDIENTE

Se analiza el costo del consumo energético de acuerdo con el tiempo de uso diario total por espacio según los tres tipos de operación (ventilación natural, ventilación forzada y aire acondicionado). Se debe establecer el estado de operación de cada tipo de estrategia para cada hora y con esto se presenta el modelo de consumo energético anual.

$$OSNV_{i,th} + OSFV_{i,th} + OSAA_{i,th} = Pres_{i,th} \quad Ec. 3. 20$$

$Pres_{i,th}$, presencia en el espacio i para el momento th .

$OSNV_{i,th}$, estado de operación de la estrategia de ventilación natural en el espacio i para el momento th .

$OSFV_{i,th}$, estado de operación de la estrategia de ventilación forzada en el espacio i para el momento th .

$OSAA_{i,th}$, estado de operación de la estrategia de aire acondicionado en el espacio i para el momento th .

La Ecuación 3.20 se maneja como una ecuación lógica con respuesta binaria, que tiene como restricción que si un estado de operación de cualquier estrategia se encuentra encendido (*on*), los otros estados estarán apagados (*off*), por esta razón es necesario determinar el tiempo diario de funcionamiento de cada estrategia de climatización.

- TIEMPO DIARIO DE OPERACIÓN DE VENTILACIÓN NATURAL

$$OSNVd_i = \sum_{t=1}^{24} OSNV_{i,th} \quad Ec. 3. 21$$

Donde $OSNV_{i,th}$, es el estado de operación de la estrategia de ventilación natural en el espacio i para el momento th y $OSNVd_i$ representa el tiempo diario de uso de operación de la estrategia de ventilación natural en el espacio i .

- TIEMPO DIARIO DE OPERACIÓN DE VENTILACIÓN FORZADA

$$OSFVd_i = \sum_{t=1}^{24} OSFV_{i,th} \quad Ec. 3. 22$$

Donde $OSFV_{i,th}$, es el estado de operación de la estrategia de ventilación forzada en el espacio i para el momento th y $OSFVd_i$ representa el tiempo diario de uso de operación de la estrategia de ventilación forzada en el espacio i .

Para el análisis del costo del consumo energético anual de operación se considera como tiempo de trabajo un total de 220 días de operación durante el año (2 semestres), 18 semanas por semestre de lunes a sábado.

$$C_{CEAex_1} = 220 \cdot OSFV_{d_1} \cdot (Nex_{1,1} \cdot Pex_{1,1} + Nex_{1,2} \cdot Pex_{1,2}) \cdot \frac{CUV}{1000} \quad Ec. 3. 23$$

$$C_{CEAex_2} = 220 \cdot OSFV_{d_2} \cdot (Nex_{2,1} \cdot Pex_{2,1} + Nex_{2,2} \cdot Pex_{2,2}) \cdot \frac{CUV}{1000} \quad Ec. 3. 24$$

$$C_{CEAex_3} = 220 \cdot OSFV_{d_3} \cdot (Nex_{3,1} \cdot Pex_{3,1} + Nex_{3,2} \cdot Pex_{3,2}) \cdot \frac{CUV}{1000} \quad Ec. 3. 25$$

Nex_{ij} , número de extractores en la zona j del espacio i .

$P_{ex_{i,j}}$, potencia de extractor de la zona j del espacio i.

C_{CEAex_i} , costo del consumo energético anual de extractores en el espacio i.

- TIEMPO DIARIO DE OPERACIÓN DE AA INDEPENDIENTE

Para calcular el costo del consumo energético por aula considerando un sistema de AA independiente se utiliza la siguiente ecuación para determinar el tiempo de uso diario total por cada espacio:

$$OSAA_i d = \sum_{t=1}^{24} OSAA_{i,th} \quad Ec. 3. 26$$

Donde $OSAA_{i,th}$, es el estado de operación de la estrategia de aire acondicionado en el espacio i para el momento th y $OSAA_i d$ representa el tiempo diario de uso de operación de la estrategia de aire acondicionado en el espacio i.

Para el análisis del costo del consumo energético de operación anual se considera como tiempo de trabajo un total de 220 días de operación durante el año (2 semestres), 18 semanas por semestre de lunes a sábado, y una demanda promedio por tonelada de refrigeración (DPTR).

$$C_{CEAAI_1} = 220 \cdot OSAA_1 d \cdot NAAI_1 \cdot CapAA_1 \cdot DPTR \cdot \frac{CUV}{1000} \quad Ec. 3. 27$$

$$C_{CEAAI_2} = 220 \cdot OSAA_2 d \cdot NAAI_2 \cdot CapAA_2 \cdot DPTR \cdot \frac{CUV}{1000} \quad Ec. 3. 28$$

$$C_{CEAAI_3} = 220 \cdot OSAA_3 d \cdot NAAI_3 \cdot CapAA_3 \cdot DPTR \cdot \frac{CUV}{1000} \quad Ec. 3.29$$

C_{CEAAI_i} , costo del consumo energético de AA independientes del espacio i.

$NAAI_i$, número de unidades de AA en el espacio i.

$CapAA_i$, capacidad de unidades de AA del espacio i.

$DPTR$, demanda promedio por tonelada de refrigeración expresada en W/TR.

3.2.2 COSTO DEL CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL PARA AIRES ACONDICIONADOS CONSIDERANDO UNIDADES CENTRALES

Para el análisis del costo energético anual se tienen en cuenta dos casos que permiten controlar la operación de las unidades centrales:

- Caso A: Análisis por control de horario.
- Caso B: Análisis por control de presencia y temperatura.

Para los casos A y B se tiene una demanda energética fija, ya sea para dos o tres aulas con unidad central. Consiste en la demanda ocasionada por mantener encendida la unidad central de aire acondicionado y el costo será igual en A y B.

$$CFUCAA_{12} = 0,3 \cdot CapUCAA_{12} \quad Ec. 3. 30$$

$$CFUCAA_{23} = 0,3 \cdot CapUCAA_{23} \quad Ec. 3. 31$$

$$CFUCAA_{13} = 0,3 \cdot CapUCAA_{13} \quad Ec. 3. 32$$

$$CFUCAA_{123} = 0,3 \cdot CapUCAA_{123} \quad Ec. 3. 33$$

Donde, $CFUCAA$ es el consumo energético fijo de la unidad central de aire acondicionado cuando opera según horario fijo y $CapUCAA$ que es la capacidad en toneladas de refrigeración de la unidad central de aire acondicionado para los espacios.

Ahora, se realiza un análisis para una demanda energética variable debida al uso efectivo del aire acondicionado en cada espacio, va a ser igual para A y B.

$$CVUCAA_1 = 0,7 \cdot CapAAmin_1 \quad Ec. 3. 34$$

$$CVUCAA_2 = 0,7 \cdot CapAAmin_2 \quad Ec. 3. 35$$

$$CVUCAA_3 = 0,7 \cdot CapAAmin_3 \quad Ec. 3. 36$$

Para el modelo $CVUCAA_i$ hace referencia al consumo variable de la unidad central de aire acondicionado en el espacio i y $CapAAmin_i$ que es la capacidad mínima del aire acondicionado que se da en toneladas de refrigeración y se halla como se indicó en la Ecuación 3.13.

- CASO A : ANÁLISIS POR CONTROL DE HORARIO

El costo energético en este caso considera 18 horas de encendido de las unidades centrales, lo cual sólo afecta al consumo fijo.

$$C_{CEUCAAh_{12}} = 220 \cdot ((OSAA_1 d \cdot CVUCAAA_1) + (OSAA_2 d \cdot CVUCAAA_2) + (18 \cdot CFUCAAA_{12})) \cdot DPTR \cdot \frac{Cuv}{1000} \quad Ec. 3. 37$$

$$C_{CEUCAAh_{13}} = 220 \cdot ((OSAA_1 d \cdot CVUCAAA_1) + (OSAA_3 d \cdot CVUCAAA_3) + (18 \cdot CFUCAAA_{13})) \cdot DPTR \cdot \frac{Cuv}{1000} \quad Ec. 3. 38$$

$$C_{CEUCAAh_{23}} = 220 \cdot ((OSAA_2 d \cdot CVUCAAA_2) + (OSAA_3 d \cdot CVUCAAA_3) + (18 \cdot CFUCAAA_{23})) \cdot DPTR \cdot \frac{Cuv}{1000} \quad Ec. 3. 39$$

$$C_{CEUCAAh_{123}} = 220 \cdot ((OSAA_1 d \cdot CVUCAAA_1) + (OSAA_2 d \cdot CVUCAAA_2) + (OSAA_3 d \cdot CVUCAAA_3) + (18 \cdot CFUCAAA_{123})) \cdot DPTR \cdot \frac{Cuv}{1000} \quad Ec. 3. 40$$

$C_{CEUCAAh_{ij \text{ o } ijk}}$, costo del consumo energético de la unidad central de aire acondicionado cuando opera según horario fijo.

$OSAA_i d$, tiempo diario de uso de operación de la estrategia de aire acondicionado en el espacio i.

$CFUCAAA_{ij}$, consumo fijo de unidad central de aire acondicionado para los espacios i, j o i, j, k.

- CASO B: ANÁLISIS POR CONTROL DE PRESENCIA Y TEMPERATURA

Este tipo de análisis se realiza con base en la lectura de presencia y temperatura del espacio para establecer el encendido de la unidad central. Para un primer caso se distingue el tiempo diario de aire acondicionado según la necesidad de cada espacio, como muestra la siguiente ecuación:

$$OSAA_i d = \sum_{t=1}^{24} OSAA_{i,t} \quad Ec. 3. 41$$

Como se observa en la Ecuación 3.41, en esta ocasión se comporta como aire acondicionado independiente, ya que se analiza cada espacio por separado.

Ahora se va a tener en cuenta el tiempo diario de encendido de cada unidad central (UC), donde se considera que al menos uno de los espacios requiere el servicio de aire acondicionado, se explica en las siguientes ecuaciones:

$$OSUC_{12} d = \sum_{t=1}^{24} (OSAA_{1,t} + OSAA_{2,t} - (OSAA_{1,t} \cdot OSAA_{2,t})) \quad Ec. 3. 42$$

$$OSUC_{13} d = \sum_{t=1}^{24} (OSAA_{1,t} + OSAA_{3,t} - (OSAA_{1,t} \cdot OSAA_{3,t})) \quad Ec. 3. 43$$

$$OSUC_{23} d = \sum_{t=1}^{24} (OSAA_{2,t} + OSAA_{3,t} - (OSAA_{2,t} \cdot OSAA_{3,t})) \quad Ec. 3. 44$$

$$OSUC_{123} d = \sum_{t=1}^{24} (OSAA_{1,t} + OSAA_{2,t} + OSAA_{3,t} - (OSAA_{1,t} \cdot OSAA_{2,t}) - (OSAA_{1,t} \cdot OSAA_{3,t}) - (OSAA_{2,t} \cdot OSAA_{3,t}) + (OSAA_{1,t} \cdot OSAA_{2,t} \cdot OSAA_{3,t})) \quad Ec. 3. 45$$

Donde $OSUC_{ijk} d$, representa el tiempo diario de encendido de la unidad central de aire acondicionado de los espacios ijk , el análisis se realiza con los tiempos diarios de operación del aire acondicionado por espacio $OSAA_i d$. Con esto se determinan las ecuaciones de costo del consumo energético de la unidad central de aire acondicionado para los espacios ijk cuando opera según horario fijo.

$$C_{CEUCAAp_{12}} = 220 \cdot ((OSAA_1 d \cdot CVUCAA_1) + (OSAA_2 d \cdot CVUCAA_2) + (OSUC_{12} d \cdot CFUCAA_{12})) \cdot DPTR \cdot \frac{Cuv}{1000} \quad Ec. 3. 46$$

$$C_{CEUCAAp_{13}} = 220 \cdot ((OSAA_1 d \cdot CVUCAA_1) + (OSAA_3 d \cdot CVUCAA_3) + (OSUC_{13} d \cdot CFUCAA_{13})) \cdot DPTR \cdot \frac{Cuv}{1000} \quad Ec. 3. 47$$

$$C_{CEUCAAp_{23}} = 220 \cdot ((OSAA_2d \cdot CVUCAA_2) + (OSAA_3d \cdot CVUCAA_3) + (OSUC_{23}d \cdot CFUCAA_{23})) \cdot DPTR \cdot \frac{Cuv}{1000}. \quad Ec. 3. 48$$

$$C_{CEUCAAp_{123}} = 220 \cdot (((OSAA_1d \cdot CVUCAA_1) + (OSAA_2d \cdot CVUCAA_2) + (OSAA_3d \cdot CVUCAA_3) + OSUC_{123}d \cdot CFUCAA_{123})) \cdot DPTR \cdot \frac{Cuv}{1000}. \quad Ec. 3. 49$$

Para determinar el $C_{CEUCAAp_{ij}}$ o ijk se tiene en cuenta el consumo variable de aire acondicionado en los espacios cuando hay unidad central ($CVUCAA_i$), el consumo energético de la unidad central de aire acondicionado para cada espacio ($CFUCAA_i$) y el tiempo diario de operación del aire acondicionado por espacio ($OSAA_i$).

3.3 COSTO DE MANTENIMIENTO ANUAL

En esta sección se analiza el comportamiento de la variable C_{mnt} , la cual hace referencia al costo de mantenimiento de las diversas tecnologías consideradas para ejecutar las estrategias de climatización durante el periodo de tiempo considerado en el proyecto (20 años).

3.3.1 COSTO DEL MANTENIMIENTO ANUAL POR EXTRACTORES Y UNIDADES DE AIRE ACONDICIONADO INDEPENDIENTE

Los costos de mantenimiento de los extractores se consideran de forma anual y serán constantes durante su vida útil, ya que éstos tienen una vida útil de 20 años. El costo unitario anual de mantenimiento de un extractor ($C_{UmanAex}$) no dependerá de la potencia de los extractores.

$$C_{manANEX} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 (NE66_{ij} + NE115_{ij} + NE150_{ij}) \cdot C_{UmanAex} \quad Ec. 3. 50$$

$C_{manANEX_{ta}}$, Costo de mantenimiento anual por extractores para el año ta .

$NE66_{ij}$, número de extractores de 66 W por espacio ij .

$NE115_{ij}$, número de extractores de 115 W por espacio ij .

$NE150_{ij}$, número de extractores de 150 W por espacio ij .

Para el caso de los aires acondicionados independientes se realizan dos tipos de mantenimiento a lo largo del tiempo de estudio, un mantenimiento correctivo o de cambio de piezas por unidad de aire acondicionado que será igual al 25% del costo de inversión y se realizará cada 5 años y un mantenimiento preventivo que se realizará de forma anual y será de \$100.000 ($CUMpreAAI$). Los costos de mantenimiento no dependen de la capacidad de la unidad de aire acondicionado.

Tabla 13. Costo mantenimiento para las unidades de aire acondicionado

$CManAA_{i,ta}$			
t (año)	Espacio 1	Espacio 2	Espacio 3
1	$NAAI_1 \cdot CUMpreAA$	$NAAI_2 \cdot CUMpreAA$	$NAAI_3 \cdot CUMpreAA$
2	$NAAI_1 \cdot CUMpreAA$	$NAAI_2 \cdot CUMpreAA$	$NAAI_3 \cdot CUMpreAA$
3	$NAAI_1 \cdot CUMpreAA$	$NAAI_2 \cdot CUMpreAA$	$NAAI_3 \cdot CUMpreAA$
4	$NAAI_1 \cdot CUMpreAA$	$NAAI_1 \cdot CUMpreAA$	$NAAI_3 \cdot CUMpreAA$
5	$NAAI_1 \cdot CUMpreAA +$ $0,25 \cdot IAAI_1$	$NAAI_2 \cdot CUMpreAA +$ $0,25 \cdot IAAI_2$	$NAAI_3 \cdot CUMpreAA +$ $0,25 \cdot IAAI_3$
6	$NAAI_1 \cdot CUMpreAA$	$NAAI_2 \cdot CUMpreAA$	$NAAI_3 \cdot CUMpreAA$
...
20	$NAAI_1 \cdot CUMpreAA +$ $0,25 \cdot IAAI_1$	$NAAI_2 \cdot CUMpreAA +$ $0,25 \cdot IAAI_2$	$NAAI_3 \cdot CUMpreAA +$ $0,25 \cdot IAAI_3$

En la Tabla 13, se proyecta el costo de mantenimiento a 20 años, donde $NAAI_i$ representa el número de aires acondicionados independientes por cada espacio i .

3.3.2 COSTO DEL MANTENIMIENTO PARA AIRES ACONDICIONADOS CONSIDERANDO UNIDADES CENTRALES

El análisis será igual por horario y por control de presencia y temperatura, donde el costo unitario de mantenimiento preventivo anual de unidad central será de \$500.000 ($CUMpreUC$) y no depende de la capacidad y su mantenimiento

correctivo o de cambio de piezas por unidad de aire acondicionado será igual al 25% del costo de inversión y se realizará cada 5 años.

Tabla 14. Costo mantenimiento aire acondicionado con unidad central

<i>t</i> (años)	<i>CManUC_{ta}</i>			
	UC 12	UC 23	UC 13	UC 123
1	<i>CUMpreUC</i>	<i>CUMpreUC</i>	<i>CMpreUC</i>	<i>CMpreUC</i>
2	<i>CUMpreUC</i>	<i>CUMpreUC</i>	<i>CMpreUC</i>	<i>CMpreUC</i>
3	<i>CUMpreUC</i>	<i>CUMpreUC</i>	<i>CMpreUC</i>	<i>CMpreUC</i>
4	<i>CUMpreUC</i>	<i>CUMpreUC</i>	<i>CMpreUC</i>	<i>CMpreUC</i>
5	<i>CUMpreUC</i> + 0,25 · <i>C_UCA</i> ₁₂	<i>CUMpreUC</i> + 0,25 · <i>C_UCAA</i> ₁₃	<i>CUMpreUC</i> + 0,25 · <i>C_UCA</i>	<i>CUMpreUC</i> + 0,25 · <i>C_UCAA</i> ₁₂₃
6	<i>CUMpreUC</i>	<i>CMpreUC</i>	<i>CMpreUC</i>	<i>CMpreUC</i>
....
20	<i>CUMpreUC</i> + 0,25 · <i>C_UCAA</i> ₁₂	<i>CUMpreUC</i> + 0,25 · <i>C_UCAA</i> ₁₃	<i>CUMpreUC</i> + 0,25 · <i>C_UCA</i>	<i>CUMpreUC</i> + 0,25 · <i>C_UCAA</i> ₁₂₃

En la Tabla 14 se proyecta el costo de mantenimiento a 20 años donde *CUMpreUC*, representa el costo de unitario de mantenimiento preventivo para cada unidad central.

3.4 PLANTEAMIENTO DEL MODELO TÉRMICO

Este planteamiento se basa en un análisis horario del comportamiento térmico de los espacios interiores, dado que las variables independientes (radiación solar, viento, presencia, número de personas, etc.) se comportan de forma horaria. Adicionalmente, se asume que al finalizar cada hora se ha logrado una condición de estabilidad en la temperatura de cada espacio interior; por tanto, se emplea el enfoque de estado estable.

La Ecuación 3.51 describe lo que sucede con la temperatura interior a lo largo de un lapso de 1 hora aplicando ventilación natural o ventilación forzada.

$$T_{int,th} = T_{amb,th} + \frac{\dot{Q}_{in,th}}{\dot{m}_{v,th}c_{air}} \quad Ec. 3. 51$$

Donde,

$T_{amb,th}$, temperatura ambiente a la hora th expresada en °C.

$\dot{Q}_{in,th}$, flujo de calor entrante al espacio en la hora th expresado en W.

$\dot{m}_{v,th}$, flujo de masa de aire de ventilación en el espacio a la hora th expresado en kg/s.

c_{air} , calor específico del aire expresado en W*s/kg*°C.

Con base en la expresión anterior se establece la restricción de operación que se debe cumplir para cada espacio durante las 24 horas del día como sigue:

$$OSNV_{i,j,th} \cdot T_{int_{NV},i,j,th} + OSFV_{i,j,th} \cdot T_{int_{FV},i,j,th} + OSAA_{i,j,th} \cdot T_{int_{AA},i,j,th} \leq 25,5^{\circ}C \quad Ec. 3. 52$$

- Para el caso de ventilación natural

$$T_{int_{NV},i,j,th} = T_{amb,th} + \frac{\dot{Q}_{in,th,i,j}}{\rho_{air} \cdot A_{wi_{nv},i,j} \cdot v_{wi,i,j} \cdot c_{air}} \quad Ec. 3. 53$$

- Para el caso de ventilación forzada

$$T_{int_{FV},i,j,th} = T_{amb,th} + \frac{\dot{Q}_{in,th,i,j}}{\rho_{air} \cdot Ca_{uex}(Pex_{i,j}) \cdot (Next) \cdot c_{air}} \quad Ec. 3. 54$$

- Para el caso de aire acondicionado

$$T_{int_{AA},i,j,th} = 25^{\circ}C \quad Ec. 3. 55$$

- Para el caso de ventilación natural, forzada o aire acondicionado

$$OSNV_{i,j,th} * \left(T_{amb,th} + \frac{\dot{Q}_{in,th,i,j}}{\rho_{air} \cdot A_{wi_{nv},i,j} \cdot v_{wi,i,j} \cdot c_{air}} \right) + OSFV_{i,j,th} * \left(T_{amb,th} + \frac{\dot{Q}_{in,th}}{\rho_{air} \cdot Ca_{uex}(Pex_{i,j}) \cdot (Next)} \right) + OSAA_{i,th} * (25) \leq 25,5^{\circ}C \quad Ec. 3. 56$$

- Sólo si ambas zonas tienen ventilación natural, se operará bajo ese modelo.

$$OSNV_{i,th} = OSNV_{i,1,th} * OSNV_{i,2,th} \quad Ec. 3. 57$$

Se operará en modo ventilación natural si alguna de las zonas funciona en ventilación natural y la otra en ventilación forzada o ambas operan en ventilación forzada.

$$OSFV_{i,th} = OSFV_{i,1,th} + OSFV_{i,2,th} - (OSFV_{i,1,th} \cdot OSFV_{i,2,th}) \quad Ec. 3. 58$$

4 PLANTEAMIENTO DE LA PROGRAMACIÓN NO LINEAL PARA EL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

A continuación se muestra el modelo matemático utilizado para la solución del problema de optimización a través de la programación no lineal (PNL) en GAMS. La técnica de optimización por programación no lineal está basada en un entorno de desarrollo integrado (IDE) y está conectado a un grupo de optimización de terceros que resuelven el problema a través de unos bloques obligatorios y opcionales.

Los bloques obligatorios son los de variables, ecuaciones, modelo y solución. Por su parte, los opcionales son los bloques de datos y de conjuntos; que consignan las constantes, parámetros, tablas e índices. Los bloques opcionales se pueden colocar al principio o al final del modelo. Los pasos para el desarrollo de la técnica de optimización PNL se describe a través de la *Figura 23*, explicando todos los pasos realizados con el fin de solucionar el problema de optimización,

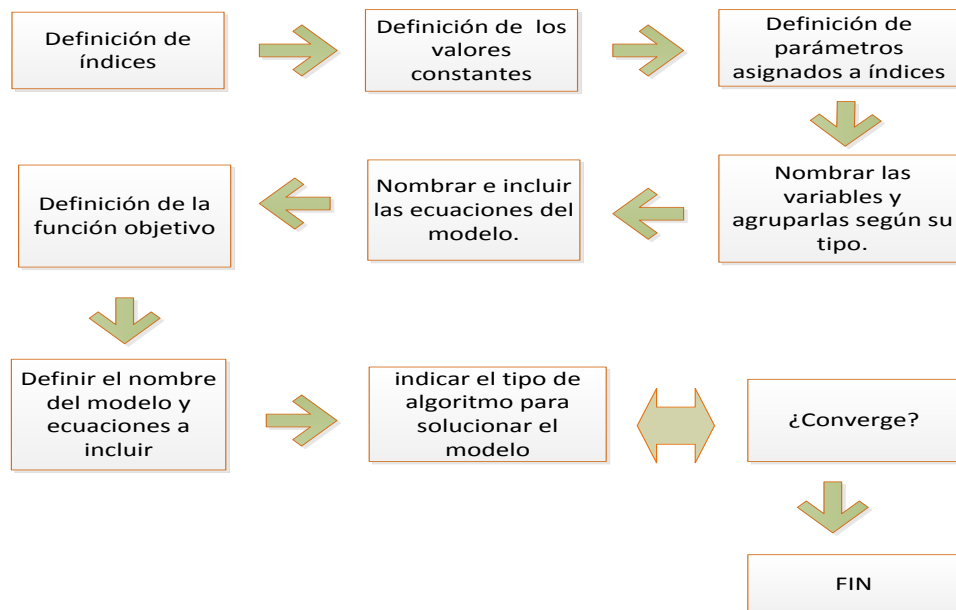


Figura 23. Pasos para el desarrollo en GAMS.

4.1 DEFINICIÓN DE LOS ÍNDICES

Los índices pertenecen al bloque opcional de conjuntos. En este caso se definieron unos valores que fueron los correspondientes a la potencia de los extractores (expresada en watts) y la capacidad de los aires acondicionados, tanto independientes como de unidad central (expresadas en toneladas de refrigeración). La *Figura 24*, muestra como se presentan los índices para usar el tiempo en años y en horas.

```
Sets
ta tiempo en años /1*20/
th tiempo en horas /1*24/ ;
```

Figura 24. Declaración de índices para el tiempo en años y el tiempo en horas.

Donde *ta* y *th* representan el tiempo dado en años y en horas, respectivamente.

4.2 DEFINICIÓN DE LOS VALORES CONSTANTES

Las constantes pertenecen al bloque de datos y son los valores que permanecen fijos en el modelo, se presentan entre estos valores los datos de densidad del aire, área de las ventanas, calor específico del aire, costo unitario de mantenimiento preventivo de aires acondicionados independientes y con unidad central, la inversión en los sensores de temperatura y presencia, la inversión en detectores de apertura, el costo unitario del mantenimiento preventivo de los extractores, la temperatura ambiente, la velocidad del viento y las cargas térmicas de los espacios 1,2 y 3.

La *Figura 25* presenta la manera como se incluyen algunas de las variables anteriormente nombradas en el modelo.

```
Aw1 Área de las ventanas /1 /
Cair Calor específico del aire /1012/
```

Figura 25. Definición de valores constantes.

4.3 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS ASIGNADOS A LOS ÍNDICES

Los parámetros hacen parte del bloque opcional de conjuntos. Los parámetros son utilizados para definir valores que están relacionadas a los índices; para ello se define el parámetro y se le asigna un valor a cada índice como se muestra en la *Figura 26*, en la que se indica la descripción del parámetro para la temperatura ambiente presente en cada hora del día $Tamb(th)$.

PARAMETER	Tamb(Th) * Temperatura ambiente en °C
/1	23
2	22
3	22
4	21
5	21
6	21
7	20.5
8	22
9	24
10	25
11	26
12	26.5
13	27
14	27
15	27
16	26.5
17	26
18	25
19	25
20	24
21	24
22	23
23	23
24	23/;

Figura 26. Definición de parámetros del modelo.

Donde th es el índice fijo a la hora el día, y el valor que se asigna a cada índice corresponde a la temperatura ambiente.

4.4 ASIGNACIÓN DE NOMBRE A LAS VARIABLES Y AGRUPACIÓN SEGÚN SU TIPO

El bloque de variables es obligatorio para la descripción de cualquier modelo a optimizar, en este se declaran la totalidad de variables que se van a trabajar en la descripción de este.

VARIABLES

VPN Valor presente neto
Rt (ta) Flujo neto de dinero
R0 Inversión
Copt Costo de operación

Figura 27. Definición de variables enteras del modelo.

De acuerdo a las características de cada problema, se pueden tener diferentes tipos de variables, por lo que estas se deben agrupar en bloques, indicando su clase, su punto de partida y si tienen o no restricciones.

Binary Variables

OS_NVd1 Tiempo diario de operación ventilación natural en el espacio i
OS_FVd1 Tiempo diario de operación ventilación forzado en el espacio i
OS_AAd1 Tiempo diario de operación AA en el espacio i
OS_NVd2 Tiempo diario de operación ventilación natural en el espacio i
OS_FVd2 Tiempo diario de operación ventilación forzado en el espacio i
OS_AAd2 Tiempo diario de operación AA en el espacio i
OS_NVd3 Tiempo diario de operación ventilación natural en el espacio i
OS_FVd3 Tiempo diario de operación ventilación forzado en el espacio i
OS_AAd3 Tiempo diario de operación AA en el espacio i

Figura 28. Definición de variables binarias del modelo.

Para este modelo de optimización se describieron variables positivas, enteras y binarias. Las figuras 27 y 28 muestran los bloques donde se introdujeron los tipos de variables anteriormente mencionados.

4.5 PRESENTACIÓN DE LAS ECUACIONES DEL MODELO

El bloque de ecuaciones pertenece a los bloques obligatorios del modelo. En este se declaran y definen las ecuaciones que se van a usar en el modelo tal y como se muestra en la Figura 29.

- RestTermNV1.. OS_NV1*(Tamb - CTE1/ (pair*Aw1*VelViento*Cair))=I=25.5;
- RestTermNV2.. OS_NV2*(Tamb - CTE2/ (pair*Aw1*VelViento*Cair))=I=25.5;
- RestTermNV3.. OS_NV3*(Tamb - CTE3/ (pair*Aw1*VelViento*Cair))=I=25.5;

Figura 29. Declaración de las ecuaciones del modelo.

En la figura anterior se indican las ecuaciones que relacionan la operación de cada estrategia con la temperatura deseada.

4.6 DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo hace parte del conjunto de ecuaciones declaradas en el bloque de ecuaciones, para este modelo de optimización la función objetivo también llamada función de costo, la cual genera una salida a partir de unas determinadas variables de entrada o vector de entrada.

```
FOBJE.. VPN =e= -1*(-R0+sum(ta , Rt(ta)/(1+it**ta2(ta)))) ;  
|
```

Figura 30. Declaración de la función objetivo.

De acuerdo a las características del problema de optimización, la función objetivo representa el valor presente neto (VPN) del proyecto de inversión con una proyección de 20 años.

4.7 DEFINICIÓN DEL MODELO Y DE LAS ECUACIONES A INCLUIR

En este bloque se definen que ecuaciones integran el modelo; si se necesitan utilizar todas las ecuaciones descritas se utiliza la palabra *all* como en el caso de estudio. La *Figura 31* muestra la estructura del bloque.

```
Model Climat /all/ ;
```

Figura 31. Definición del modelo y sus ecuaciones.

4.8 DECLARACIÓN DEL TIPO DE ALGORITMO PARA SOLUCIONAR EL MODELO

En este bloque se debe indicar que tipo de algoritmo se desea usar para resolver el modelo definido previamente, esto se debe asignar dependiendo si el modelo es lineal (LP), no lineal (NLP) o no lineal entera mixta (MINLP). Como se muestra

en la *Figura 32*, el modelo de optimización se analizó con programación no lineal entera mixta, ya que se tienen variables continuas y discretas.

`SOLVE Climat using MINLP minimizing VPN;`

Figura 32. Declaración del tipo de algoritmo.

La elección del *solver* para el algoritmo desarrollado se tomó de acuerdo a que cada uno tiene la capacidad de solucionar distintos algoritmos. En el caso del modelo de optimización utilizado en este proyecto de investigación se contemplaron los *solver* que trabajan con programación no lineal entera mixta BARON, SCIP, COUENNE y ANTIGONE. En la *Figura 33* se muestran las distintas opciones de *solver* que se pueden elegir en GAMS.

The screenshot shows the 'Options' dialog box in GAMS. It has a menu bar with 'Editor', 'Execute', 'Output', 'Solvers', 'Licenses', 'Colors', 'File Extensions', 'Charts/GDX', and 'Execute2'. Below the menu bar is a 'Project Defaults' dropdown, 'Reset', and 'Legend' buttons. The main area is a table with columns for Solver, License, and various problem types (CNS, DNLP, EMP, LP, MCP, MINLP, MIP, MIQCP, MPEC, NLP, QCP, RMINLP, RMIP, RMIQCF). The 'SCIP' solver is selected, indicated by 'X' marks in the CNS, DNLP, MINLP, MIP, MIQCP, NLP, QCP, RMINLP, and RMIQCF columns.

Solver	License	CNS	DNLP	EMP	LP	MCP	MINLP	MIP	MIQCP	MPEC	NLP	QCP	RMINLP	RMIP	RMIQCF
OSICPLEX	31 days				.			.						.	
OSIGUROBI	31 days				.			.						.	
OSIMOSEK	31 days				.			.						.	
OSIXPRESS	31 days				.			.						.	
PATH	31 days	.				.									
PATHNLP	31 days		.		.						.	.	.	.	.
SBB	31 days						.		.						
SCIP	31 days	X	X				X	X	X		X	X	X		X
SNOPT	31 days	.	.		.						.	.	.	.	.
SOPLEX	31 days				.									.	
SULUM	31 days				.			.						.	
XA	31 days				.			.						.	
XPRESS	31 days				.			.	.			.		.	.

Figura 33. Elección del solver.

5 PLANTEAMIENTO DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

A continuación en la *Figura 34*, se muestra el modelo matemático desarrollado para el problema de optimización a través de la técnica meta-heurística de algoritmos genéticos (AG). Los algoritmos genéticos corresponden a los métodos estocásticos de búsqueda, esta técnica se basa en la selección natural y la recombinación genética [26]. A través de esta, una población evoluciona o se adapta al problema, para que, al final se tenga una población de buenas soluciones o que permiten maximizar el “*fitness*” [27].

Con el fin de solucionar el problema de optimización planteado en este proyecto de investigación se desarrollaron los pasos que se describen a continuación.

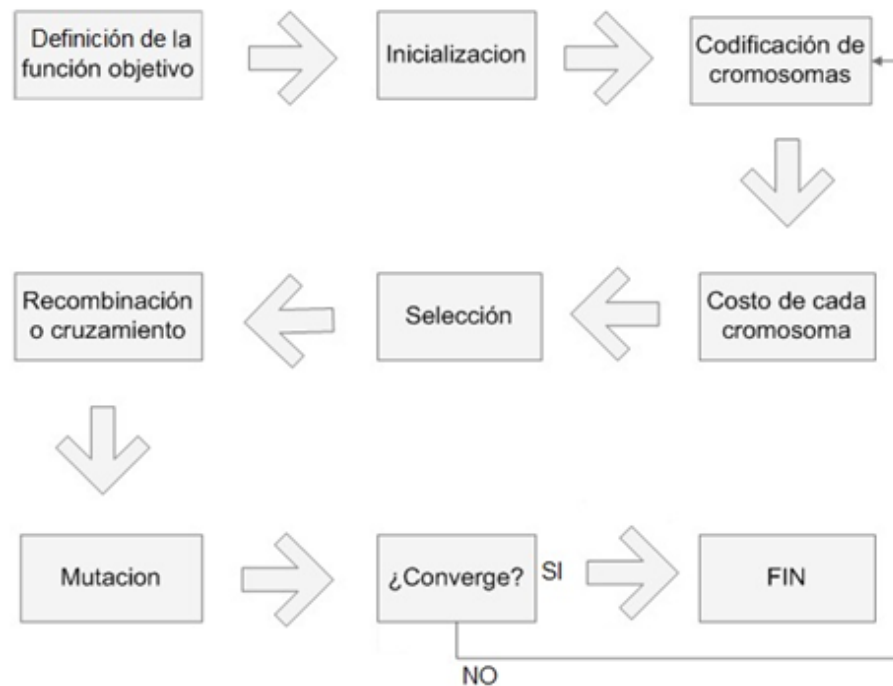


Figura 34. Pasos para el desarrollo del A.G.

5.1 DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

Representa la función a optimizar y depende de otras variables del modelo que se describieron en el modelo matemático y en el modelo térmico.

5.1.1 VARIABLES DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

Las variables representan las entradas de la función objetivo. Estas se organizan en un vector que al ser codificado representa una cadena de bits, en la que cada bit se considera un gen y una cadena de ellos se denominada cromosoma, generándose así una población de cromosomas que de acuerdo a su función de mérito crearán poblaciones de hijos mediante las operaciones de selección, cruce y mutación contraladas mediante parámetros probabilísticos y procesos aleatorios [28].

El vector cromosoma para el AG se define incluyendo el número de variables como un vector fila de longitud $l = \#var$ y se expresa como sigue:

$$Cromosoma = [P_1 P_2 \dots P_{\#var}]$$

Donde, P_i representa las distintas variables presentes en el AG después del proceso de codificación y el espacio de búsqueda lo constituyen 2^l cromosomas.

Todas las variables deben ser restringidas. Para este caso las restricciones de las variables se definen como sigue:

- Variables de tipos de elementos: La cota superior está definida por el número de tipos a los que se pueda acceder en el mercado y se deseen tener en cuenta para el desarrollo e implementación del sistema de climatización.
- Las variables de número de elementos: están acotadas de acuerdo a criterios energéticos de dimensionamiento.

Así, a cada variable del problema se le asigna un rango el cual se calcula como la diferencia entre la cota superior y la cota inferior más uno.

$$RANGO = Cota_{superior} - Cota_{inferior} + 1 \quad Ec. 5. 1$$

5.1.2 FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo (también llamada función de costos) es la función a maximizar o minimizar en el planteamiento del AG. Esta genera una salida o vector de salida (costo(s)) en respuesta a una entrada o vector de entrada [28]. En dicha función se condensan todas las particularidades a tener en cuenta de las variables presentadas en el vector *chromosoma*. Por esto, esta función depende del número de variables.

$$función_{objetivo} = f(Cromosoma)$$

El costo tiene asociado la definición de *fitness*, que es la encargada de evaluar que tan “buenos” son los individuos dependiendo del tipo de problema que se esté tratando (maximizar o minimizar), de esta manera, un valor alto del costo de una función objetivo implicará un *fitness* bajo.

$$Costo = 1/fitness$$

El problema de optimización que se presenta en esta investigación es un problema discreto, ya que se utilizan combinaciones binarias para la expresión de los cromosomas, así, cada una de las variables del cromosoma se expresa en forma binaria. Para poder llevar esto a cabo existe un proceso de codificación, el cual se encarga de ordenar de manera adecuada a cada uno de los valores de las variables en forma binaria. De la misma manera, existe un proceso de decodificación que se encarga de evaluar la función objetivo, la cual depende de números decimales y no de números binarios [29].

5.1.3 VECTOR DE DISEÑO Y RESTRICCIONES DEL ALGORITMO GENÉTICO

Un problema de optimización está definido por un conjunto de cantidades las cuales son vistas como variables de diseño dentro del problema, dichas variables en conjunto hacen parte de lo que se conoce como vector de diseño o vector *X* [30]. En el diseño del código para el AG del problema de optimización se generó el siguiente vector de diseño como se muestra en la *Figura 35*.

```

function ObjctiveFunction= funcion_objetivo(x)
%% Funcion Objetivo - Metodo Algoritmos Geneticos
% Vector de diseño

tipoextra= x(1); %% Tipos de extractores del problema.
tipoAI1= x(2); %% Tipos de AA Independiente en el espacio 1.
tipoAI2= x(3); %% Tipos de AA Independiente en el espacio 2.
tipoAI3= x(4); %% Tipos de AA Independiente en el espacio 3.
NAAI1= x(5); %% Número de AA en el espacio 1.
NAAI2= x(6); %% Número de AA en el espacio 2.
NAAI3= x(7); %% Número de AA en el espacio 3.
Nextra1= x(8); %% Número de extractores en el espacio 1.
Nextra2= x(9); %% Número de extractores en el espacio 2.
Nextra3= x(10); %% Número de extractores en el espacio 3.
tipoUC12= x(11); %% Tipo de UC en los espacios 1 y 2.
tipoUC13= x(12); %% Tipo de UC en los espacios 1 y 3.
tipoUC23= x(13); %% Tipo de UC en los espacios 2 y 3.
tipoUC123= x(14); %% Tipo de UC en los espacios 1, 2 y 3.
a= x(15); %% Existencia de UC en los espacios 1 y 2.
b= x(16); %% Existencia de UC en los espacios 1 y 3.
c= x(17); %% Existencia de UC en los espacios 2 y 3.
d= x(18); %% Existencia de UC en los espacios 1, 2 y 3.
e= x(19); %% Calculo de costos para UC Caso A.
f= ~x(19); %% Calculo de costos para UC Caso B.
w= x(20); %% Existencia de AA Independiente en espacio 1.
y= x(21); %% Existencia de AA Independiente en espacio 2.
z= x(22); %% Existencia de AA Independiente en espacio 3.

```

Figura 35. Vector de diseño para el AG.

Donde $x(i)$ representa la posición de cada una de las variables dentro del vector.

En el desarrollo del código, se hizo necesario incluir las variables a, b, c, d, w, y, z debido a que el planteamiento del modelo incluye algunas restricciones de operación que se deben cumplir. Estas restricciones son:

- No pueden ubicarse unidades de aire acondicionado independiente y unidades centrales en el mismo espacio.
- De ser necesario, se debe elegir solo una de las cuatro posibles ubicaciones de unidad central que existen (UC12, UC13, UC23 ò UC123).

A partir del planteamiento del vector de diseño se generan dos vectores *lb* y *ub* que establecen los límites de la región de solución del AG como se muestra en la *Figura 36*.

```
%Límites de la region de solucion del vector x
lb=[1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 1 2 2 3 0 0 0 0 0 0 0];
ub=[3 4 4 4 4 4 4 20 20 20 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1];
```

Figura 36. Región de solución del AG.

La solución potencial al problema de optimización puede ser presentada dando valores a las variables que lo componen, las cuales en conjunto forman genes, que al ser codificados en una cadena de valores dan origen a los cromosomas del algoritmo genético. El proceso de codificación del genoma de un individuo inicia cuando cada variable del vector de diseño toma aleatoriamente un valor dentro de los límites pre establecidos para cada una de ellas de acuerdo a la región de solución del algoritmo genético. Gracias a dicha aleatoriedad, se pueden obtener muchos individuos que tras varios procesos son evaluados en la función objetivo.

Finalmente se establecieron los diferentes tipos de restricciones necesarios para el desarrollo del AG de acuerdo a las características del problema de optimización.

- **RESTRICCIONES DE VARIABLES ENTERAS:** se representa mediante un vector en el que se ubican los índices de las variables del vector de diseño que solo pueden tomar valores enteros. Para el caso de estudio se incluyeron todas las variables, esto con el fin de evitar que las variables tomen ciertos valores que de acuerdo a las características del problema de optimización no son válidos, por ejemplo el número de aires acondicionados en un espacio.
- **RESTRICCIONES NO LINEALES:** está representada mediante la función *@nonlinearcons*, la cual calcula el valor de las igualdades y desigualdades no lineales del problema (*Ceq* y *C*). La función *@nonlinearcons* alberga las restricciones de temperatura máxima, la restricción del valor de la función objetivo y la capacidad mínima en cada espacio de acuerdo a las características del problema de optimización.

5.2 PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO.

Para el desarrollo del modelo de optimización se variaron parámetros que el *toolbox* de optimización de MATLAB (*optimtool*) tiene pre-establecidos, esto con el objetivo de encontrar valores que permitan encontrar la solución óptima y obtener un ahorro significativo de tiempo en la simulación, teniendo en cuenta los tipos de restricciones que el modelo presenta en AG (restricciones de variables enteras, restricciones lineales de desigualdad y restricciones no lineales de desigualdad).

5.3 POBLACIÓN INICIAL

Indica la población inicial para el algoritmo genético, donde cada individuo representa una posible solución, pero no es la solución misma. La población puede ser generada aleatoriamente por el algoritmo con N cromosomas y l número de bits, por lo que dicha población se puede representar con una matriz de unos y ceros de $N_{cromosomas} \times l_{bits}$ [33].

Para el caso de estudio, la población inicial fue creada de acuerdo a los valores establecidos en la región de búsqueda del algoritmo con el objetivo de aumentar la probabilidad de una convergencia hacia un óptimo global. Dentro de las características que puede tener la población inicial se establecieron las siguientes:

- TIPO DE POBLACIÓN

Especifica el tipo de entrada para la función de *fitness*. El tipo de población con que se trabaja fue '*doubleVector*', ya que para los demás tipos de poblaciones no se satisfacen las restricciones lineales de desigualdad [23].

- TAMAÑO DE LA POBLACIÓN

Especifica cuantos individuos hay en cada generación. Se establecieron valores por encima de 1000 individuos hasta encontrar un valor con el cual se pueda garantizar un grado de aleatoriedad que permita que el algoritmo genético tenga una alta probabilidad de éxito. Para el caso de estudio se eligió tener una población de 8000 individuos.

5.4 CODIFICACIÓN DE CROMOSOMAS

Se supone que los individuos (posibles soluciones del problema) pueden representarse como un conjunto de parámetros (genes) los cuales, como se mencionó anteriormente, agrupados forman un vector de valores llamado cromosoma. En este caso cada cromosoma es una cadena de bits (0 o 1), esto permite que el dominio de la función a optimizar quede transformada en un conjunto de valores acotados representados en cadenas, independientemente de su origen [31].

El proceso de codificación inicia con el cálculo de los bits necesarios para representar de forma adecuada las diferentes cantidades de las variables de acuerdo al rango que cada una posee.

De acuerdo a lo anterior y teniendo en cuenta que las variables del problema de optimización son enteras (la precisión debe ser cero), es posible calcular entonces la cantidad de bits que representará cada una de las variables dentro del cromosoma como sigue:

$$\frac{\text{Rango}}{2^n} \leq 1 \quad \text{Ec. 5.2}$$

Entonces, por ejemplo, la variable *tipoextra* que representa los 3 diferentes tipos de extractores (Rango=3) que se consideran en el problema de optimización puede ser representada como mínimo por 2 bits. Al final del proceso, el cromosoma será un vector de N posiciones, donde N se calcula como sigue:

$$N = \sum_{i=1}^{Nvar} Nbits_i \quad \text{Ec. 5.3}$$

De esta manera al codificar todas las variables se considera terminado el proceso de codificación dado que los elementos de la población se generan como números binarios y se procede a decodificarlos posteriormente para la evaluación de la función objetivo.

5.5 DECODIFICACIÓN DE CROMOSOMAS

El proceso de decodificación convierte cada uno de los individuos de la población (cadenas binarias), a sus respectivos valores reales, para ser evaluados a través de una función objetivo [32]. A los individuos representados por sus valores reales se les conoce como fenotipos. La decodificación se puede realizar por medio del código binario estándar y se obtienen los vectores de elementos, de combinación binaria y un vector de paso.

Las diferentes posiciones del vector de elementos son números enteros que se enumeran, comenzando en la cota inferior del rango los elementos del mismo. Los vectores de combinación muestran las posibles mezclas con el número de bits correspondiente a cada entrada.

Así, para las entradas de tipos de tecnologías de extractores (*Next*), si se tiene 4 diferentes, entonces los vectores se muestran a continuación:

$$V_{elementos} = [0,1,2,4]$$

$$V_{comb_{binaria}} = [000,001,010,011, 101,110, 100,111]$$

Dado que la población inicial se genera en forma binaria se requiere una serie de vectores decodificadores. Este vector tiene el mismo número de elementos del que se necesita decodificar.

Cada posición del vector se da en potencias de dos comenzando por el cero y avanzando hacia la izquierda, entonces, si se tiene un vector $X = [0, 1, 1]$ de tres posiciones, por esta razón se necesita un vector de tres posiciones como sigue:

$$V_{dec} = [2^0, 2^1, 2^2]$$

Así, el número entero correspondiente a la combinación del vector X se encuentra multiplicando el vector por el transpuesto de su vector decodificador.

$$Número = X * T(V_{dec}) \quad Ec. 5.4$$

5.6 COSTO DE LOS CROMOSOMAS

Encontrar el costo de cada cromosoma se limita evaluar la función objetivo para cada uno de ellos, el algoritmo genético procesa poblaciones de cromosomas, reemplazando sucesivamente cada población por otra, así se evalúa la función objetivo para cada una de las variables de entrada. El algoritmo suele requerir una función de capacidad o potencial que asigna una puntuación (la capacidad) a cada cromosoma de la población actual.

La capacidad o el potencial de un cromosoma depende de cómo resuelva ese cromosoma el problema a tratar [33]. Por lo anterior es necesario llevar el proceso de decodificación ya que la función objetivo es función de números enteros y no de números binarios.

5.7 ELECCIÓN DE LA FUNCIÓN DE SELECCIÓN

La función de selección es la encargada de elegir a los individuos que harán de progenitores para la próxima generación. Se debe asegurar que los padres sean cromosomas distintos para evitar que la descendencia sean los mismos padres y que no se escojan simplemente los individuos más adaptados porque esto degeneraría en problemas de diversidad genética donde aparecerían súper individuos y así una convergencia prematura [34].

La selección puede realizarse de diversas maneras, para el caso de este proyecto de investigación se usó la función de selección estocástica uniforme (*Selection function Stochastic Uniform*) ya que con este se obtuvieron los mejores resultados a la hora de calcular el valor de la función objetivo.

5.8 REPRODUCCIÓN

Determina de qué manera el algoritmo genético crea los nuevos individuos en cada generación. Los cambios realizados en este caso fueron:

Elite count: especifica el número de individuos a los cuales se les garantiza la supervivencia para la siguiente generación. Estos individuos son los mejores de cada generación por lo que representan un óptimo local.

Crossover fraction: indica la frecuencia con la que se producen cruces entre los cromosomas padres, es decir que haya probabilidad de reproducción entre ellos. La probabilidad de cruce elegida fue de 0.95 lo que representa una probabilidad de cruce alta para cada padre.

5.9 MUTACIÓN

La misión de la función de mutación es complementar a la de cruce insertando cambios inesperados en los individuos. De este modo la población evoluciona en todas direcciones, de manera que se obtienen tanto individuos más dotados como de peor calidad, ampliando así la posibilidad de explorar el espacio de búsqueda en zonas que de otra manera quedarían ocultas [34].

El caso de mutación sería cambiar un bit del cromosoma del estado "0" al estado "1" o viceversa, el proceso de mutación se efectúa en cromosomas que se escogen aleatoriamente. Se debe tener en cuenta que la mejor solución que se lleva en cada generación debe ser excluida del proceso de mutación; en esta exclusión se debe evaluar nuevamente el costo de cada cromosoma de la matriz de población. Según la literatura un porcentaje entre el 20% y el 30% [32], para el proceso de mutación es considerado aceptable y es muy utilizado en diferentes problemas de optimización.

Al mutar la matriz o lista de cromosomas, se obtiene una nueva población, la cual será la población inicial de la siguiente generación, comenzando el proceso nuevamente hasta alcanzar la convergencia.

5.10 GENERACIONES

Especifica el máximo número de generación que desarrolla el AG. Debido al alto grado de aleatoriedad con que trabaja el método de algoritmos genéticos es necesario establecer un número de generaciones lo suficientemente grande para permitir que el algoritmo evolucione hasta que encuentre el mínimo global.

5.11 CONVERGÉNCIA

La idea en la que se basan los AG's consiste en iterar los procesos anteriormente descritos sobre una población de individuos hasta que finalmente converjan en la solución óptima al problema. Así pues, el criterio de parada debería hacer referencia a la convergencia de la población o definir un número determinado de generaciones, de esta manera la respuesta óptima será el óptimo parcial de la última generación.

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza una presentación detallada de los resultados obtenidos por el método de programación no lineal y el algoritmo genético. Una vez presentadas las soluciones se aborda una sección de comparación en términos de desempeño y tiempo de ejecución entre las dos técnicas empleadas para solucionar el problema y se realiza una comparación del consumo energético de la solución obtenida con la solución tradicional (aires acondicionados independientes en cada espacio).

Para las simulaciones de los modelos en GAMS y en MATLAB se utilizó un equipo de cómputo con las características de hardware y software que se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Características equipo de cómputo.

Modelo	Lenovo G40
Sistema operativo	Windows 8.1
Procesador	Intel core-i5
Memoria RAM	8 GB

Al finalizar el proceso de simulación utilizando las dos técnicas de optimización, se obtuvo como resultado que la solución óptima está compuesta por la elección de un aire acondicionado independiente de 3 TR para el espacio uno, dos aires acondicionados independientes de 3 TR para el espacio dos, tres aires acondicionados independientes de 3,58 TR para el espacio tres y quince extractores de 115 W en el espacio tres. El detalle de esta solución, incluyendo los costos se presenta en las sub secciones 6.1.1 y 6.2.1.

6.1 BÚSQUEDA POR PROGRAMACIÓN NO LINEAL

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la solución del problema utilizando la programación no lineal en el software GAMS. En la Tabla 16 se presentan las características del software GAMS con las que se simuló el modelo de optimización.

Tabla 16. Características programación no lineal.

Programa	GAMS
Versión	22.4.6
Método	MINLP
Solver	ANTIGONE 1.1
Objetivo	Minimizar

6.1.1 RESULTADOS DE LA PROGRAMACIÓN NO LINEAL

En la Tabla 17 se muestra la descripción de las variables correspondientes al planteamiento del problema de optimización y los respectivos resultados obtenidos en la solución del problema. Se obtiene el valor óptimo para la minimización del impacto económico que se ha definido como la función objetivo (las cantidades de dinero están expresadas en millones de pesos).

Tabla 17. Resultados simulación GAMS

Variable		Rango
<i>Inversión en sensores de presencia</i>	<i>ISP</i>	<i>M\$ 0,715</i>
<i>Inversión en sensores de temperatura</i>	<i>IST</i>	<i>M\$ 0,9856</i>
<i>Inversión en detectores de apertura</i>	<i>IDA</i>	<i>M\$ 0,7881</i>
<i>Inversión en extractores</i>	<i>Iext</i>	<i>M\$ 20,73</i>
<i>Inversión en Aires Acondicionados Independientes</i>	<i>IAAI</i>	<i>M\$ 47,124</i>
<i>Inversión en unidad central de aire acondicionado</i>	<i>IUCAA</i>	<i>M\$ 0</i>
<i>Inversión Total</i>	<i>Ro</i>	<i>M\$ 70,34</i>
<i>Numero de aires acondicionados independientes espacio 1</i>	<i>NAAI1</i>	<i>1 unidades</i>
<i>Numero de aires acondicionados independientes espacio 2</i>	<i>NAAI2</i>	<i>2 unidades</i>
<i>Numero de aires acondicionados independientes espacio 3</i>	<i>NAAI3</i>	<i>3 unidades</i>
<i>Número de unidades centrales en los espacios 12</i>	<i>NAAUC12</i>	<i>0</i>
<i>Número de unidades centrales en los espacios 13</i>	<i>NAAUC13</i>	<i>0</i>
<i>Número de unidades centrales en los espacios 23</i>	<i>NAAUC23</i>	<i>0</i>
<i>Número de unidades centrales en los espacios 123</i>	<i>NAAUC123</i>	<i>0</i>
<i>Numero de extractores en el espacio 1</i>	<i>Next1</i>	<i>0</i>
<i>Numero de extractores en el espacio 2</i>	<i>Next2</i>	<i>0</i>
<i>Numero de extractores en el espacio 3</i>	<i>Next3</i>	<i>15</i>
<i>Costo de la energía en función del consumo anual</i>	<i>Copt</i>	<i>M\$ 12,476</i>
<i>Consumo energético anual</i>	<i>ConsEner</i>	<i>31190 kWh</i>
<i>Costo del mantenimiento durante el tiempo</i>	<i>Cmnt</i>	<i>Anexo C.</i>
<i>Flujo neto de efectivo</i>	<i>Rt</i>	<i>Anexo C.</i>

% Uso Ventilación natural durante el día espacio 1	-	14,29%
% Uso Ventilación natural durante el día espacio 2	-	8,33%
% Uso Ventilación natural durante el día espacio 3	-	8,33%
% Uso Ventilación forzada durante el día espacio 1	-	0%
% Uso Ventilación forzada durante el día espacio 2	-	0%
% Uso Ventilación forzada durante el día espacio 3	-	41,67%
% Uso aire acondicionado independiente en el día espacio 1	-	85,71%
% Uso aire acondicionado independiente en el día espacio 2	-	91,67%
% Uso aire acondicionado independiente en el día espacio 3	-	50%
% Uso de unidad central de aire acondicionado en el espacio 1	-	0%
% Uso de unidad central de aire acondicionado en el espacio 2	-	0%
% Uso de unidad central de aire acondicionado en el espacio 3	-	0%
Numero de iteraciones	-	56920
Tiempo total (s)	-	57,16
Valor presente neto	VPN	M\$ 269,22

Según los resultados mostrados en la tabla anterior, se puede concluir que utilizar la programación no lineal entera mixta en GAMS es viable para el desarrollo de este proyecto investigación, ya que se obtienen resultados que se pueden considerar óptimos de acuerdo a los resultados obtenidos con el método de algoritmos genéticos que se mostrará a continuación.

6.2 BÚSQUEDA POR ALGORITMOS GENÉTICOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la solución del problema utilizando algoritmos genéticos. En la Tabla 18 se presentan las características del software con las que se simuló el modelo de optimización.

Tabla 18. Características método de heurística AG.

Programa	MATLAB
Versión	R2015a
Método	AG
Objetivo	Minimizar

6.2.1 RESULTADOS DEL ALGORITMO GENÉTICO

En la Tabla 19 se muestra la descripción de las variables de salida correspondientes al planteamiento del problema de optimización que se llevó a cabo en este proyecto de investigación. Se obtiene el valor óptimo para la minimización del impacto económico que se ha definido como la función objetivo.

Tabla 19. Resultados simulación MATLAB

Variable		Rango
<i>Inversión en sensores de presencia</i>	ISP	M\$ 0,715
<i>Inversión en sensores de temperatura</i>	IST	M\$ 0,9856
<i>Inversión en detectores de apertura</i>	IDA	M\$ 0,7881
<i>Inversión en extractores</i>	l _{ext}	M\$ 20,73
<i>Inversión en Aires Acondicionados Independientes</i>	IAAI	M\$ 47,124
<i>Inversión en unidad central de aire acondicionado</i>	IUCAA	M\$ 0
<i>Inversión Total</i>	Ro	M\$ 70,34
<i>Numero de aires acondicionados independientes espacio 1</i>	NAAI1	1 unidades
<i>Numero de aires acondicionados independientes espacio 2</i>	NAAI2	2 unidades
<i>Numero de aires acondicionados independientes espacio 3</i>	NAAI3	3 unidades
<i>Número de unidades centrales en los espacios 12</i>	NAAUC12	0
<i>Número de unidades centrales en los espacios 13</i>	NAAUC13	0
<i>Número de unidades centrales en los espacios 23</i>	NAAUC23	0
<i>Número de unidades centrales en los espacios 123</i>	NAAUC123	0
<i>Numero de extractores en el espacio 1</i>	Next1	0
<i>Numero de extractores en el espacio 2</i>	Next2	0
<i>Numero de extractores en el espacio 3</i>	Next3	15
<i>Costo de la energía en función del consumo anual</i>	C _{opt}	M\$ 12,476
<i>Consumo energético anual</i>	ConsEner	31190 kWh
<i>Costo del mantenimiento durante el tiempo</i>	C _{mnt}	Anexo C.
<i>Flujo neto de efectivo</i>	R _t	Anexo C.
<i>% Uso Ventilación natural durante el día espacio 1</i>	-	14,29%
<i>% Uso Ventilación natural durante el día espacio 2</i>	-	8,33%
<i>% Uso Ventilación natural durante el día espacio 3</i>	-	8,33%
<i>% Uso Ventilación forzada durante el día espacio 1</i>	-	0%
<i>% Uso Ventilación forzada durante el día espacio 2</i>	-	0%
<i>% Uso Ventilación forzada durante el día espacio 3</i>	-	41,67%
<i>% Uso aire acondicionado independiente en el día espacio 1</i>	-	85,71%
<i>% Uso aire acondicionado independiente en el día espacio 2</i>	-	91,67%

<i>% Uso aire acondicionado independiente en el día espacio 3</i>	-	50%
<i>% Uso de unidad central de aire acondicionado en el espacio 1</i>	-	0%
<i>% Uso de unidad central de aire acondicionado en el espacio 2</i>	-	0%
<i>% Uso de unidad central de aire acondicionado en el espacio 3</i>	-	0%
<i>Numero de iteraciones</i>	-	100
<i>Tiempo total (s)</i>	-	1500
<i>Valor presente neto</i>	VPN	M\$ 269,22

De acuerdo a los resultados obtenidos, es posible observar que al utilizar un método heurístico de programación, como algoritmos genéticos, el resultado de la función objetivo es el esperado, de acuerdo a los resultados obtenidos con el método de programación no lineal.

También se observa que el tiempo total de ejecución que requiere el algoritmo genético para encontrar un punto de convergencia y determinar el valor óptimo de la función objetivo es aproximadamente 25 veces mayor que el empleado por el método de programación no lineal.

Esto refleja que aunque los algoritmos genéticos tienen la facilidad de operar de forma paralela con varias soluciones y la habilidad de manipular muchos parámetros simultáneamente (como no lo hacen las técnicas tradicionales, en este caso la programación no lineal), por las características propias del problema de optimización esto no es suficiente para que el algoritmo encuentre rápidamente un punto de convergencia, y que por el contrario, le tome más tiempo que el método de programación no lineal.

6.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS: PROGRAMACIÓN NO LINEAL VS ALGORITMOS GENÉTICOS

En esta sección se comparará el desempeño de las metodologías empleadas en la solución del problema. Dicha comparación se muestra en la Tabla 20 y está basada en los siguientes criterios:

- Valor presente neto: se comparó el costo financiero de las soluciones obtenidas con las técnicas mencionadas. Los costos mostrados se calcularon utilizando una tasa de interés constante del 5% anual y están relacionados con los tipos de tecnologías utilizadas y sus respectivas cantidades.
- Consumo energético anual: este parámetro permite evaluar el grado de aprovechamiento energético del sistema optimizado respecto a una solución tradicional.
- Tiempo de ejecución: esta comparación permite evaluar el desempeño de cada técnica. Lo anterior se plantea como una manera de realizar un análisis de eficacia y eficiencia del algoritmo genético y la programación no lineal.

Tabla 20. Comparación PNL Vs AG

	<i>PNL</i>	<i>AG</i>
1 <i>Tiempo total [min]</i>	0,9527	25
2 <i>Número de iteraciones</i>	56920	100
3 <i>Tiempo por iteración [min]</i>	16.74e-6	0,25
4 <i>Valor presente neto [COP]</i>	M\$ 269,22	M\$269,22
5 <i>Horas de uso de ventilación natural en los espacios</i>	4	4
6 <i>Horas de uso de ventilación forzada en los espacios</i>	5	5
7 <i>Horas de uso de ventilación con AA en los espacios</i>	29	29
8 <i>Energía eléctrica consumida por año [kWh]</i>	31190	31190

De acuerdo a lo mostrado en la tabla anterior, se observa que el porcentaje de error entre el valor presente neto obtenido en las dos técnicas es 0%, lo cual demuestra que las dos metodologías son efectivas, pero la técnica de programación no lineal presenta una mayor eficiencia.

6.4 ESTRATEGIAS DE CLIMATIZACIÓN EN CADA ESPACIO.

Las estrategias de climatización que se utilizan en cada espacio dependen principalmente del valor de la temperatura interior y su comportamiento térmico durante una hora, por esta razón se pueden obtener distintas estrategias de climatización en un mismo espacio.

Para los espacios 1,2 y 3 se obtienen las estrategias de climatización que se presentan en las figuras 37,38 y 39 respectivamente, teniendo en cuenta que durante las horas del día mostradas hay presencia en los espacios.

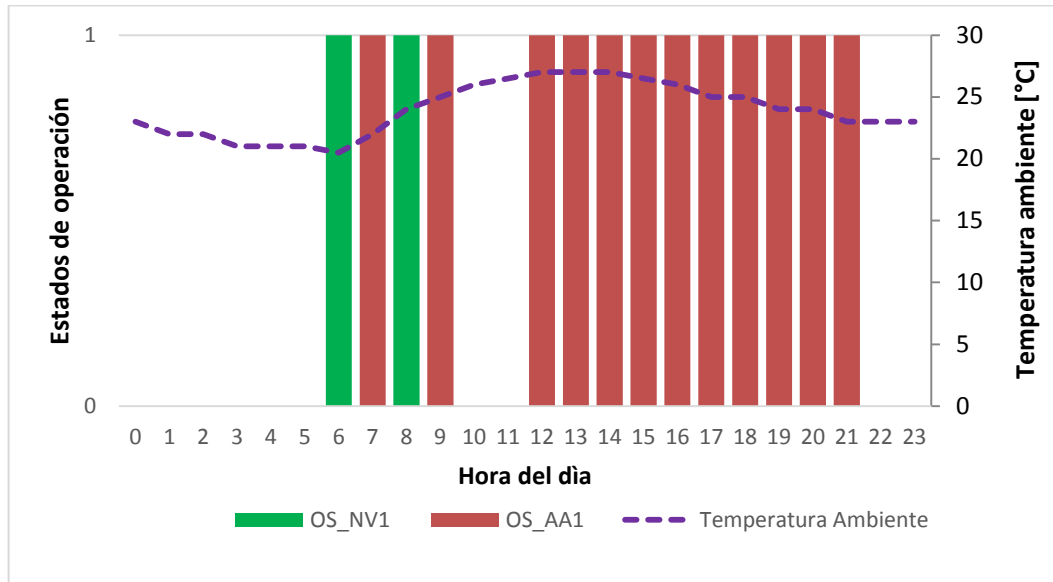


Figura 37. Estados de operación y temperatura ambiente en el espacio 1.

En la figura anterior se observa que en la franja horaria de 6-7 am se utiliza la estrategia de climatización por ventilación natural, mientras que en la hora de 7-8 am se utiliza aire acondicionado.

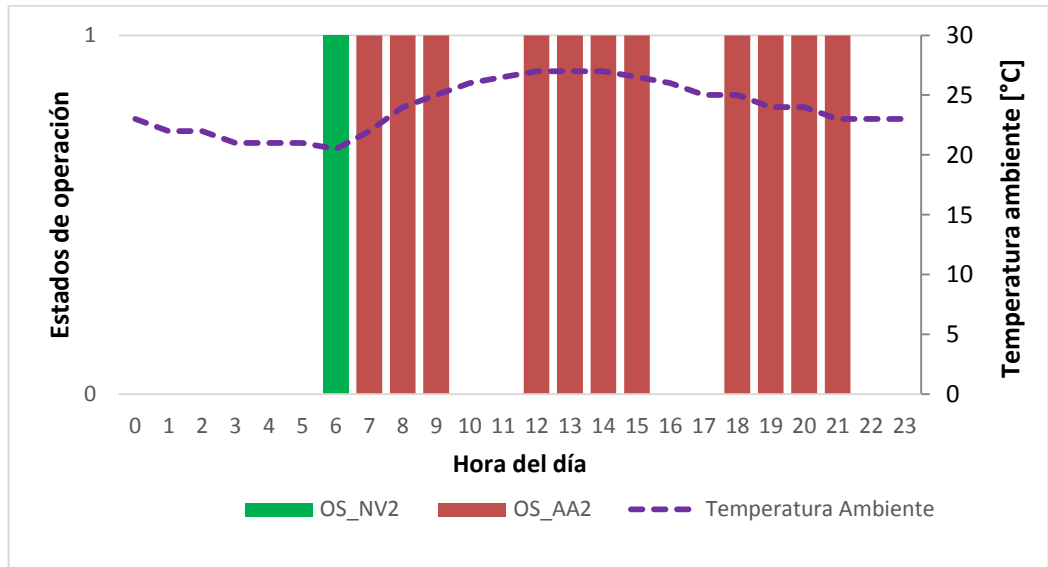


Figura 38. Estados de operación y temperatura ambiente en el espacio 2.

La figura anterior muestra que en la franja horaria de 6-7 am se utiliza la estrategia de climatización por ventilación natural, mientras que en la hora de 7-8 am se utiliza aire acondicionado.

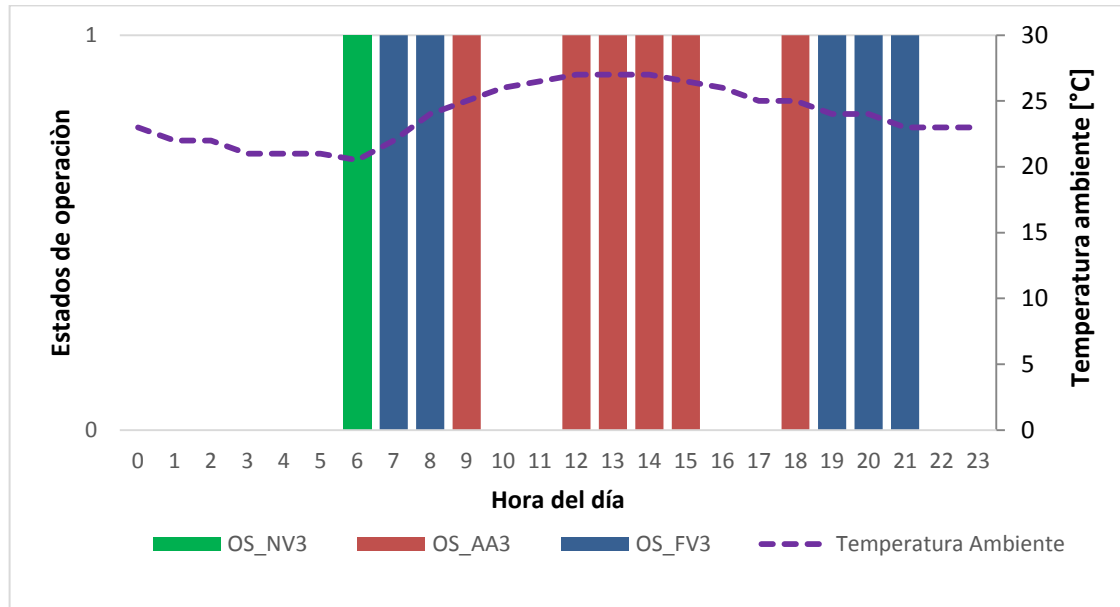


Figura 39. Estados de operación y temperatura ambiente en el espacios 3.

En la figura anterior se observa que en la franja horaria de 6-7 am se utiliza la estrategia de climatización por ventilación natural, de 7-8 am se utiliza la estrategia de ventilación forzada y de 9-10 am se utiliza aire acondicionado.

6.5 COMPARACIÓN ENTRE LA SOLUCIÓN OBTENIDA Y LA SOLUCIÓN TRADICIONAL

Se realiza la comparación entre la estrategia de climatización encontrada con el modelo de optimización y la solución tradicional (aires acondicionados independiente en cada espacio), encontrando en ambos casos la solución para el menor costo del proyecto a 20 años (ver Tabla 21). Los valores a comparar son la inversión total (R_0) y el valor presente neto (VPN).

Tabla 21. Modelo optimizado VS modelo tradicional

Variable	Estrategia optimizada (M\$)	Estrategia tradicional (M\$)
Inversión total	70,34	49,613
Valor presente neto	269,22	296,749

Donde R_t consigna los valores del mantenimiento (C_{mnt}) y el costo de operación (C_{opt}) durante el tiempo del proyecto. Los resultados obtenidos en GAMS para la solución tradicional y el costo del mantenimiento durante los 20 años del proyecto para cada estrategia de climatización pueden ser consultados en el anexo C, apartado C.2.

El ahorro energético anual de la solución determinada en el modelo de optimización comparado con la solución tradicional es la variable principal a tener en cuenta al aplicar un modelo de climatización de una manera sostenible; por esta razón se realizó la comparación porcentual ente las dos estrategias de climatización.

C_{opt} anual para la estrategia del modelo de optimización: M\$ 12,476

C_{opt} anual para la estrategia tradicional: M\$ 17,099

Aplicar la estrategia de climatización bajo el modelo de optimización ahorra en consumo energético aproximadamente 27,037% de forma anual, lo que representan M\$ 4,623 anuales menos aplicando la estrategia optimizada, aunque en el valor presente neto, que es el valor total del proyecto, solo se diferencia la estrategia optimizada con la estrategia tradicional en un 9,277% que representan M\$ 27,529 menos con la estrategia encontrada.

A continuación en la *Figura 40* se presenta la comparación del consumo energético diario en el espacio 1 para la estrategia óptima y la tradicional.

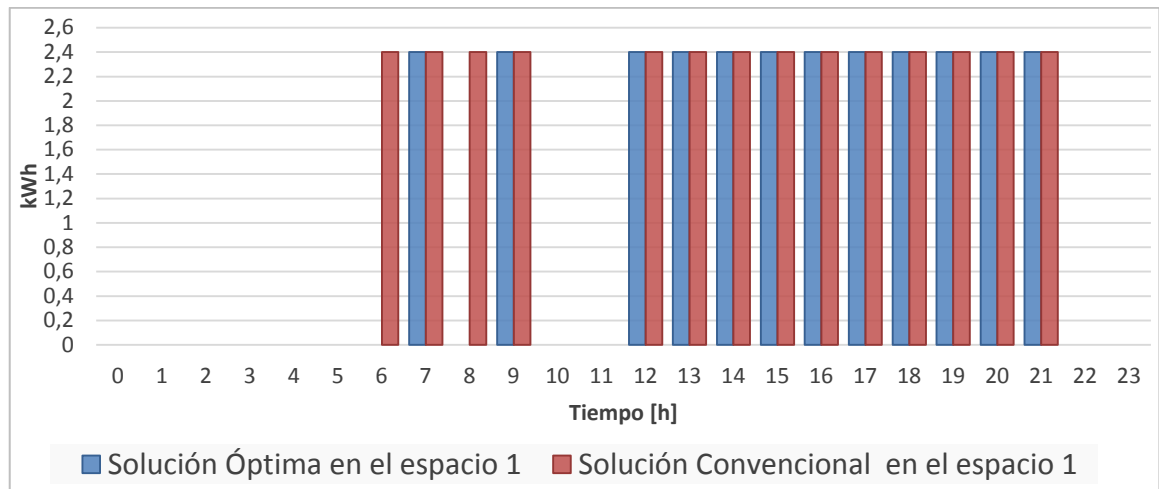


Figura 40. Consumo energético. Comparación entre estrategia tradicional y solución óptima en el espacio 1.

Para el espacio 1, a pesar de usar tanto en la estrategia optimizada como en la convencional un aire acondicionado de 3 TR, el consumo energético se reduce con la estrategia optimizada, esto se debe al poder aprovechar la ventilación natural en dos horas del día.

En la Figura 41 se presenta la comparación del consumo energético diario del espacio 2, con el objetivo de mostrar en detalle la diferencia del consumo energético de la estrategia óptima respecto a la tradicional.

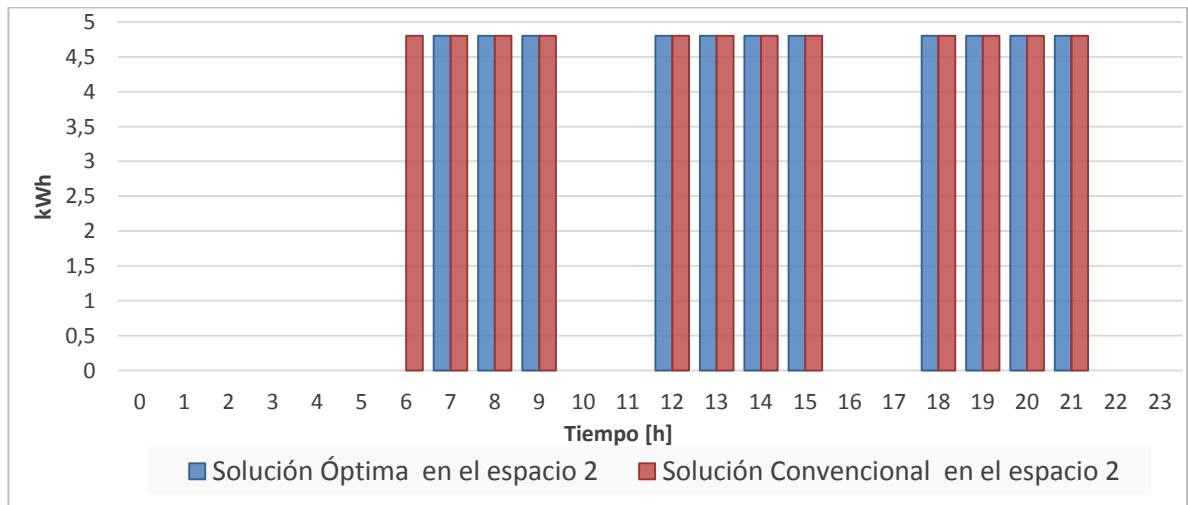


Figura 41. Consumo energético. Comparación entre estrategia tradicional y solución óptima en el espacio 2.

Para el espacio 2 el consumo energético se reduce, de la misma manera que en el espacio 1, aprovechando el uso ventilación natural; en este caso, en una hora del día.

En la *Figura 42* se presenta la comparación del consumo energético diario del espacio 3, con el objetivo de mostrar en detalle la diferencia del consumo energético de la estrategia óptima respecto a la tradicional.

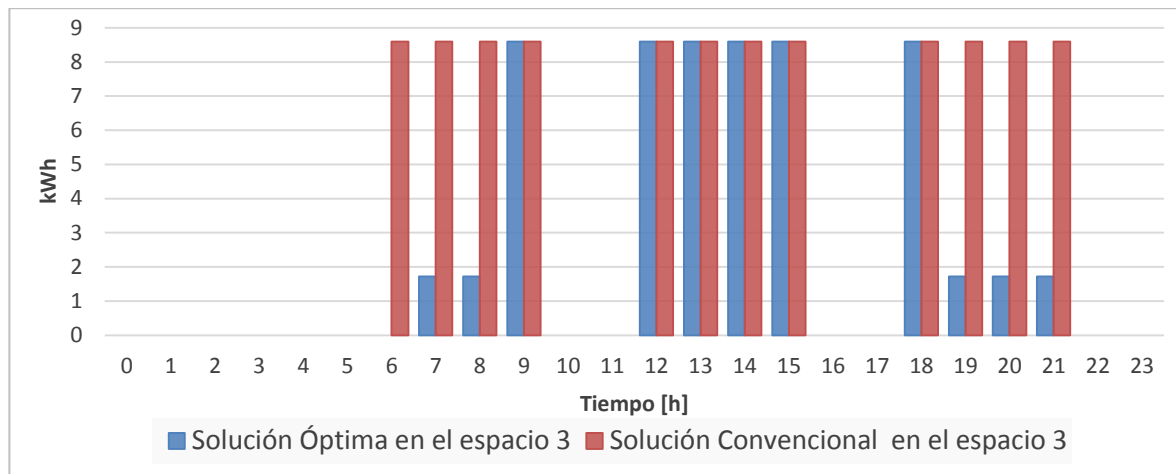


Figura 42. Consumo energético. Comparación entre estrategia tradicional y solución óptima en el espacio 3.

En el caso del espacio 3 el consumo energético es menor con la solución óptima debido a que en algunas franjas horarias es suficiente el uso de ventilación forzada para mantener la temperatura interior del espacio por debajo de la temperatura de confort, reemplazando de esta manera el uso de aire acondicionado que se emplearía en la solución tradicional.

Debido a que el consumo energético es uno de los factores más influyentes en el cálculo del valor presente neto, es importante mostrar su comportamiento para realizar una comparación efectiva entre la solución obtenida y la solución tradicional.

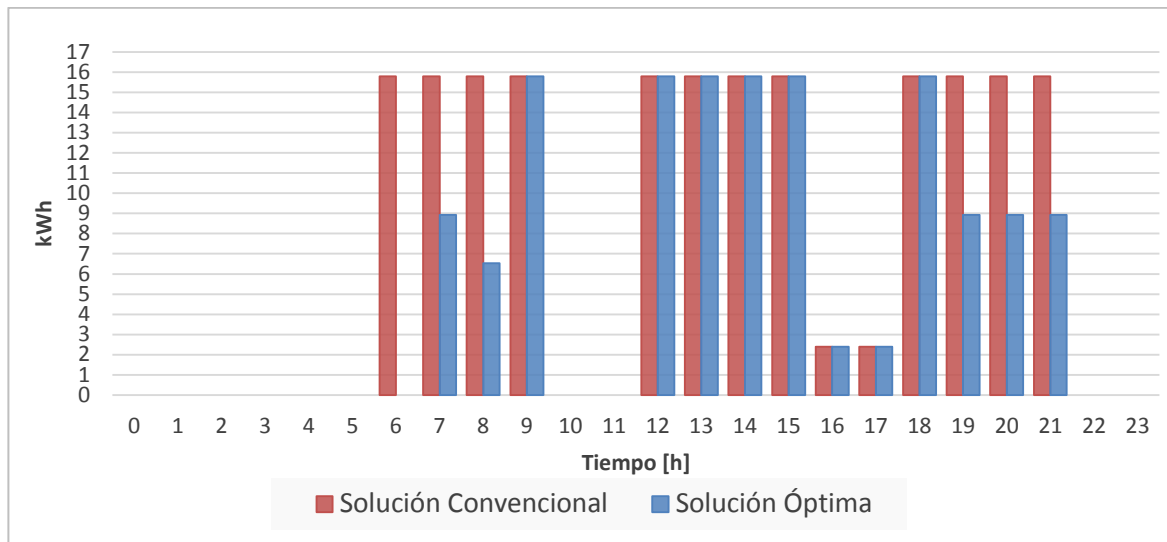


Figura 43. Consumo energético. Comparación entre estrategia tradicional y solución óptima en los 3 espacios.

En la *Figura 43* se puede observar que la implementación de la estrategia optimizada representa un ahorro, lo cual confirma lo eficaz de la solución encontrada. Este ahorro es de aproximadamente $52,527 \text{ kWh}$ diarios, lo que representa un ahorro energético anual de $11555,94 \text{ kWh}$.

6.6 APLICACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE CLIMATIZACIÓN

Las estrategias de climatización encontradas son aplicadas al modelo circuital de cada espacio para observar el comportamiento térmico al interior de cada uno de estos.

En la *tabla 9* se muestra la aplicación de las diferentes estrategias de climatización que se podrían obtener, así como el nombre y la ecuación de las diferentes fuentes que se deben agregar a los circuitos térmicos para aplicar las estrategias obtenidas. A continuación, se muestran los resultados obtenidos al aplicar las estrategias de climatización a cada uno de los espacios.

- Estrategia de climatización en el espacio 1.

El comportamiento de la temperatura interior para el espacio 1 en el horario de 8-9 am, permite que se aplique la estrategia de climatización por ventilación natural.

Como se puede observar en la *Figura 44*, antes de aplicar la estrategia de climatización la temperatura en la zona 1 del espacio era de 25,356 °C y 25,576 °C en la zona 2, lo que representaba una temperatura interior del espacio de aproximadamente 25,46 °C, justo por debajo del valor establecido para el confort térmico (25,5 °C). Tras el uso de la estrategia de ventilación natural, la temperatura del espacio descendió a un valor de 25,19 °C, ya que las temperaturas de las zonas 1 y 2 descendieron a 25,146 °C y 25,234 °C respectivamente, lo que garantiza que la temperatura siga por debajo del valor de referencia.

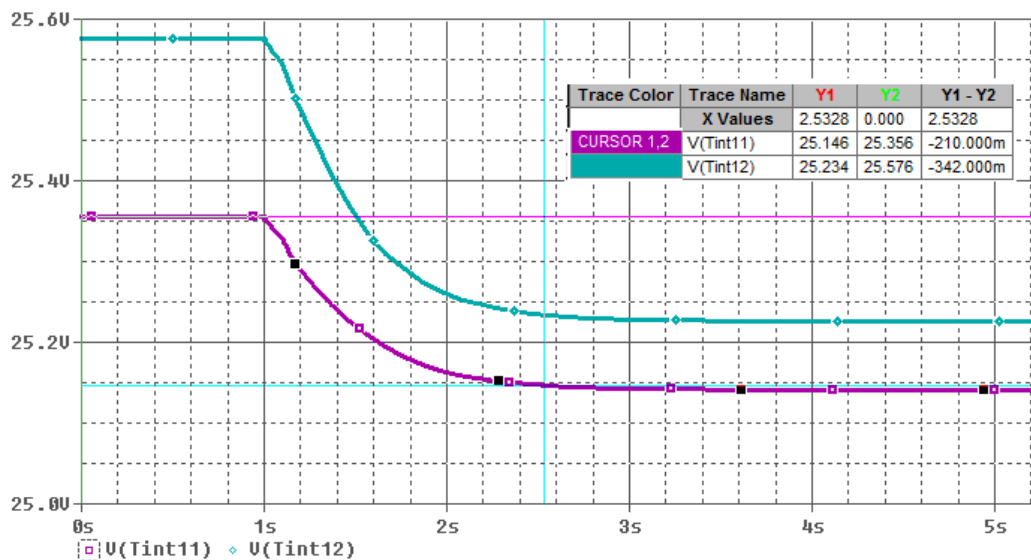


Figura 44. Temperatura interior con estrategia de ventilación natural para el espacio 1 de 8-9 am.

También se observa que en condición de estado estable, las temperaturas en las zonas del espacio toman diferentes valores, esto es debido a que los circuitos eléctricos del modelo se encuentran interactuando en todo momento con los circuitos que representan el comportamiento térmico de la fachada oeste y el muro que une los espacios 1 y 2, los cuales pueden encontrarse a diferentes temperaturas e influyen en las temperaturas de las zonas del espacio.

El espacio 1 tiene una capacidad mínima ($CapAAImin_1$) de 2,8692 TR, pero en la solución obtenida se instala 1 unidad de aire acondicionado independiente de 3 TR, lo que significan 0,1308 TR más en el espacio.

Para efectos prácticos de simulación, se agregan 1,5 TR a cada zona para calcular q_{AA11} y q_{AA12} y aplicarlo al espacio, donde tras emplear la estrategia de climatización la temperatura interior pasa de 26,822 °C a una temperatura de aproximadamente 25,58 °C, ya que la temperatura en la zona 1 es de 25,633 °C y en la zona 2 de 25,522 °C (ver Figura 45).

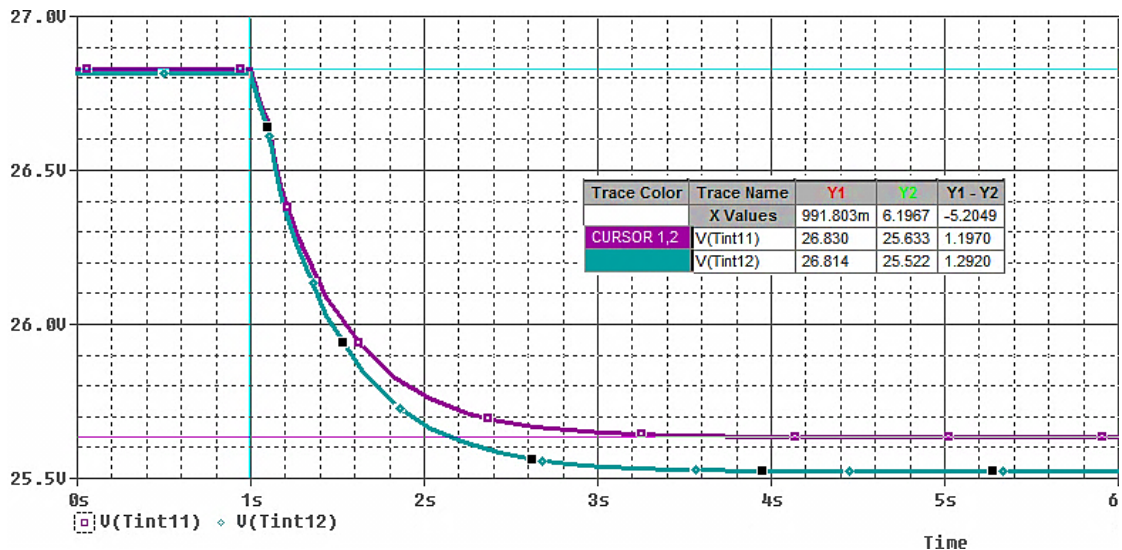


Figura 45. Temperatura interior con estrategia de aire acondicionado para el espacio 1 de 3-4 pm.

Al igual que tras implementar la estrategia de ventilación natural, se observa que en condición de estado estable, las temperaturas en las zonas del espacio también toman diferentes valores tras usar aire acondicionado, esto ocurre debido a lo mencionado anteriormente.

Aunque la temperatura interior esperada tras aplicar la estrategia de aire acondicionado es de 25 °C, es evidente la mejora del valor de la temperatura al interior del espacio. Estos resultados reflejan que el modelo térmico es una muy buena aproximación al modelo real, ya que el porcentaje de error obtenido en este caso es de 2,2674 %, lo que se puede considerar como una diferencia aceptable.

- Estrategia de climatización en el espacio 2.

El espacio 2 tiene una capacidad mínima ($CapAAImin_2$) de 5,7384 TR, pero en la solución obtenida se instalan 2 unidades de aire acondicionado independiente de 3 TR cada una, lo que significan 0,2616 TR más en el espacio. Para efectos

prácticos de simulación, se agregan 3 TR a cada zona para calcular q_{AA21} y q_{AA22} y aplicarlo al espacio.

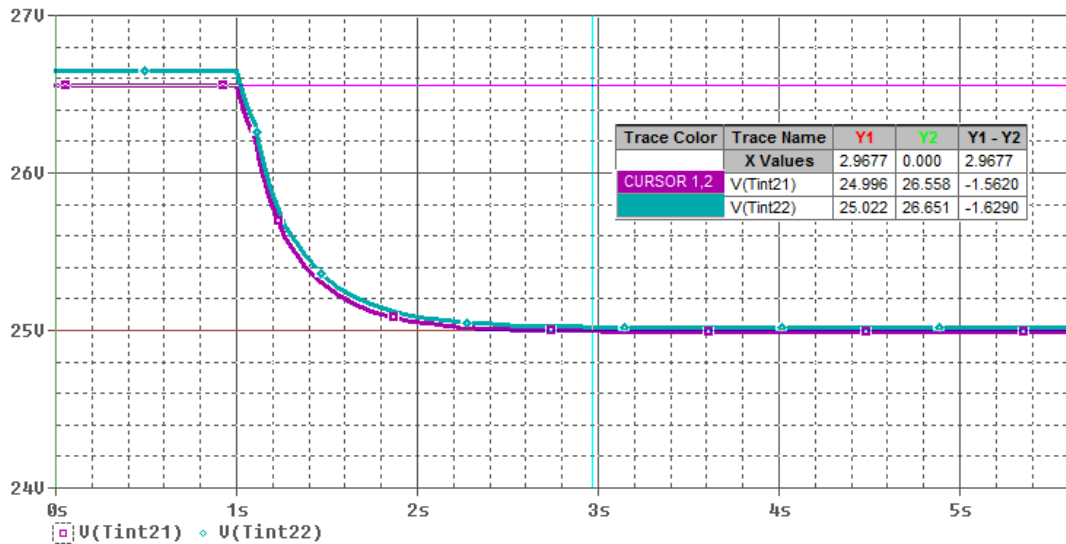


Figura 46. Temperatura interior con estrategia de aire acondicionado para el espacio 2 de 8-9 am.

Al implementar la estrategia de aire acondicionado en el horario de 8-9 am, la temperatura interior pasa de 26,6045 °C a una temperatura de 25 °C, ya que la temperatura en la zona 1 es de 24,996 °C y en la zona 2 de 25,022°C (ver Figura 46), que es el valor esperado tras aplicar la estrategia de aire acondicionado.

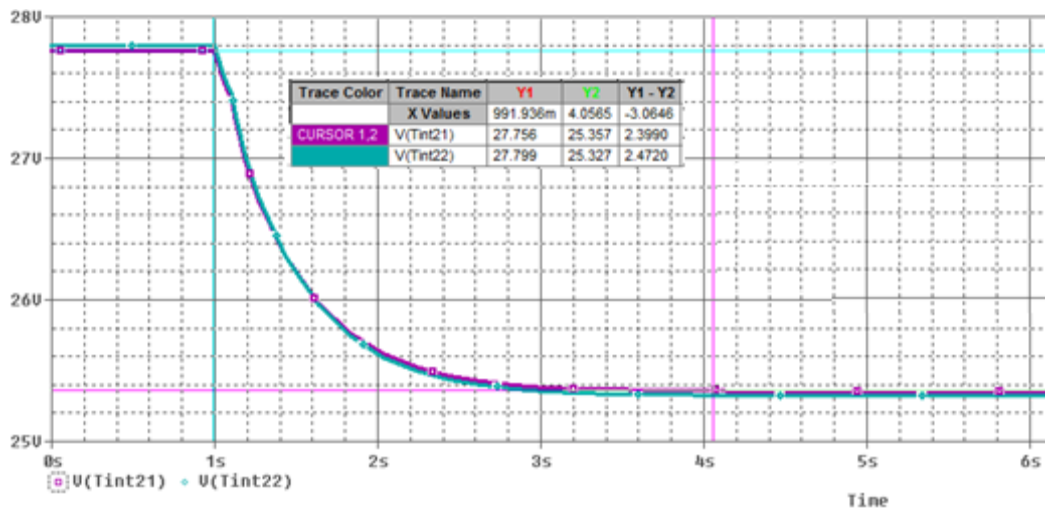


Figura 47. Temperatura interior con estrategia de aire acondicionado para el espacio 2 de 3-4 pm.

Tras emplear la estrategia de climatización en la franja horaria comprendida entre las 3 y las 4 de la tarde, la temperatura interior pasa de aproximadamente 27,8 °C a una temperatura de 25,342 °C, ya que la temperatura en la zona 1 es de 25,357 °C y en la zona 2 de 25,327°C (ver Figura 47). Esto equivale a una diferencia de 1,29 %.

- Estrategia de climatización en el espacio 3.

El comportamiento de la temperatura interior para el espacio 3 en el horario de 8-9 am permite que se aplique la estrategia de climatización por ventilación forzada asistida por extractores. La *Figura 48* muestra la temperatura interior antes y después de aplicar la estrategia de climatización.

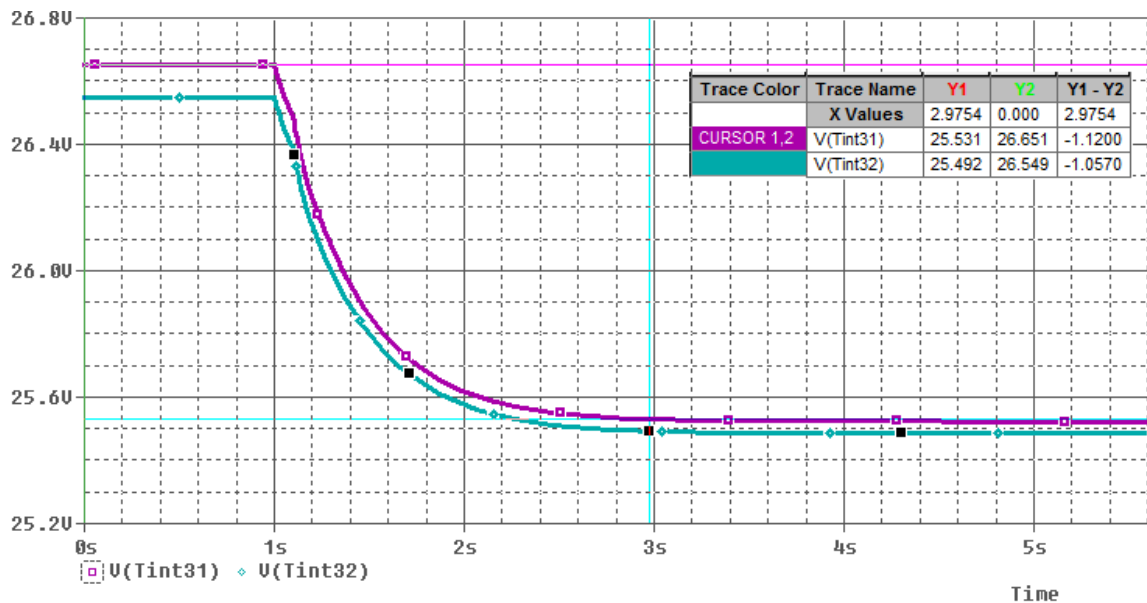


Figura 48. Temperatura interior con estrategia de ventilación forzada para el espacio 3 de 8-9 am.

Como se puede observar, antes de aplicar la estrategia de climatización la temperatura interior del espacio era de aproximadamente 26,6 °C, y tras aplicar el uso de la estrategia este valor disminuyó hasta aproximadamente 25,5 °C, justamente el valor establecido para el confort térmico

El espacio 3 tiene una capacidad mínima ($CapAAI_{min_3}$) de 9,175128 TR, pero en la solución obtenida se instalan 3 unidades de aire acondicionado independiente de 3,58 TR cada una, lo que significan 1,5648 TR más en el espacio. Para efectos

de simulación se utilizarán 5,37 TR en cada zona para calcular q_{AA31} y q_{AA32} y aplicarlo al espacio, donde tras emplear la estrategia de climatización la temperatura interior pasa de 27,88 °C a una temperatura de aproximadamente 24,80 °C, ya que la temperatura en la zona 1 es de 24,772 °C y en la zona 2 de 24,855 °C (Ver Figura 49). Esto equivale a una diferencia de 0,58 %.

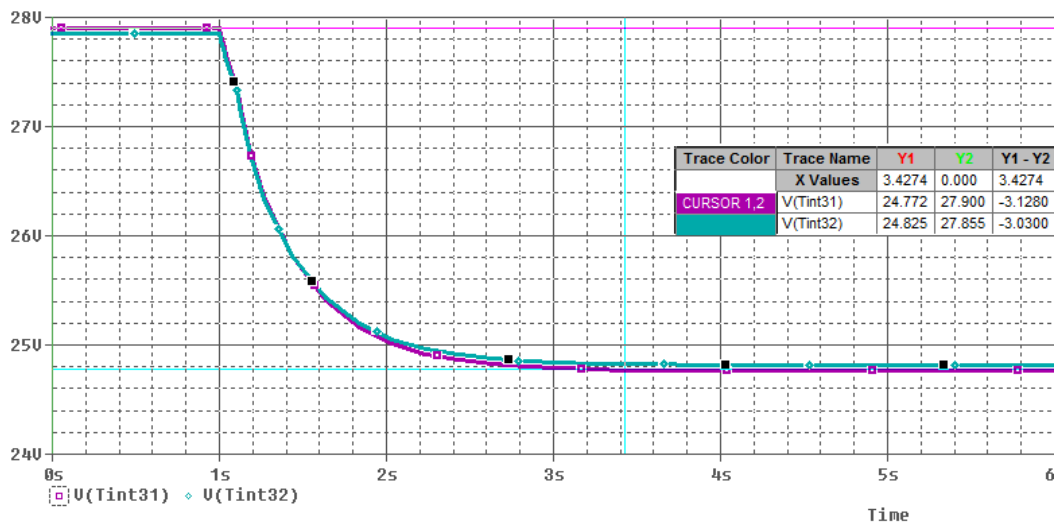


Figura 49. Temperatura interna con estrategia de aire acondicionado para el espacio 3 de 3-4 pm.

De acuerdo a los resultados mostrados, es posible observar que las estrategias de climatización utilizadas son correctas y tiene el efecto esperado sobre los espacios. Gracias a lo anterior, es posible realizar un perfil aproximado de la manera como se comporta la temperatura al interior de cada espacio a lo largo del día tras aplicar las diferentes estrategias de climatización, teniendo en cuenta que debido a que las condiciones térmicas dentro de cada espacio cambian cada hora, los parámetros del circuito eléctrico también lo harán, por lo que se hace complejo encontrar el comportamiento exacto de la temperatura al interior de los espacios.

En la parte superior de la *Figura 50* se presenta el comportamiento de la temperatura interior (rojo) y la temperatura ambiente (negro) del espacio 1, mientras que en la parte inferior se muestran las horas de uso del espacio. En el espacio 1 se ejecutan dos estrategias de climatización: ventilación natural y ventilación con aire acondicionado.

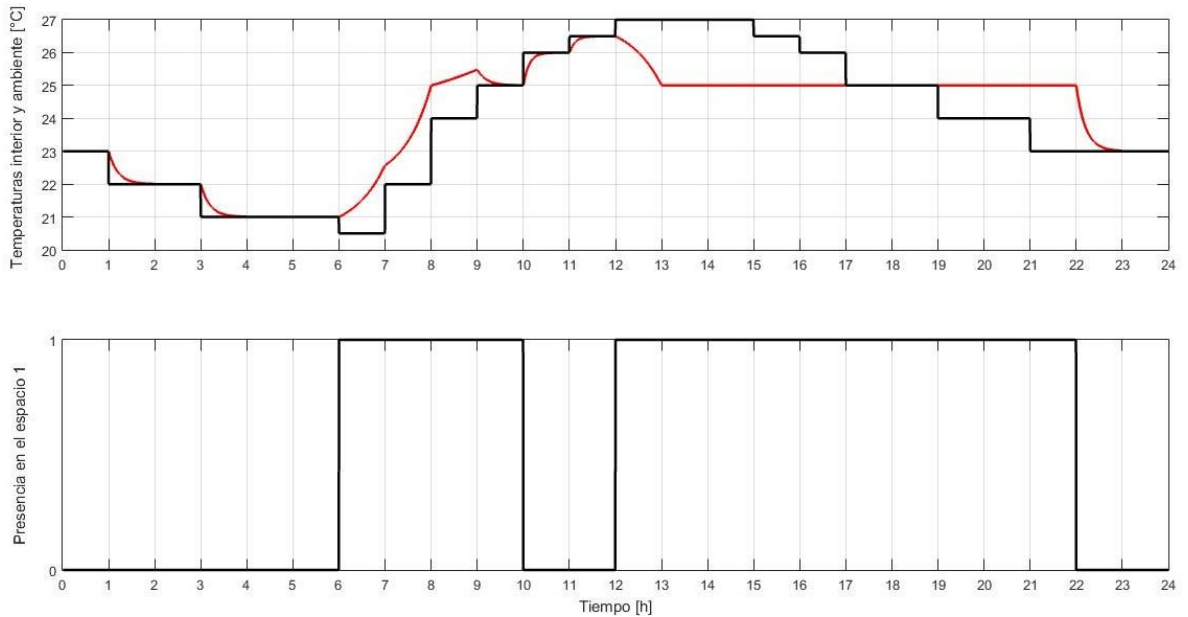


Figura 50. Comportamiento de la temperatura interior, temperatura ambiente y presencia en el espacio 1.

Al igual que en el espacio 1, en el espacio 2 operan las mismas estrategias de climatización. En la parte superior de la *Figura 51* se presenta el comportamiento de la temperatura interior (rojo) y la temperatura ambiente (negro) del espacio 2, mientras que en la parte inferior se muestran las horas de uso del espacio.

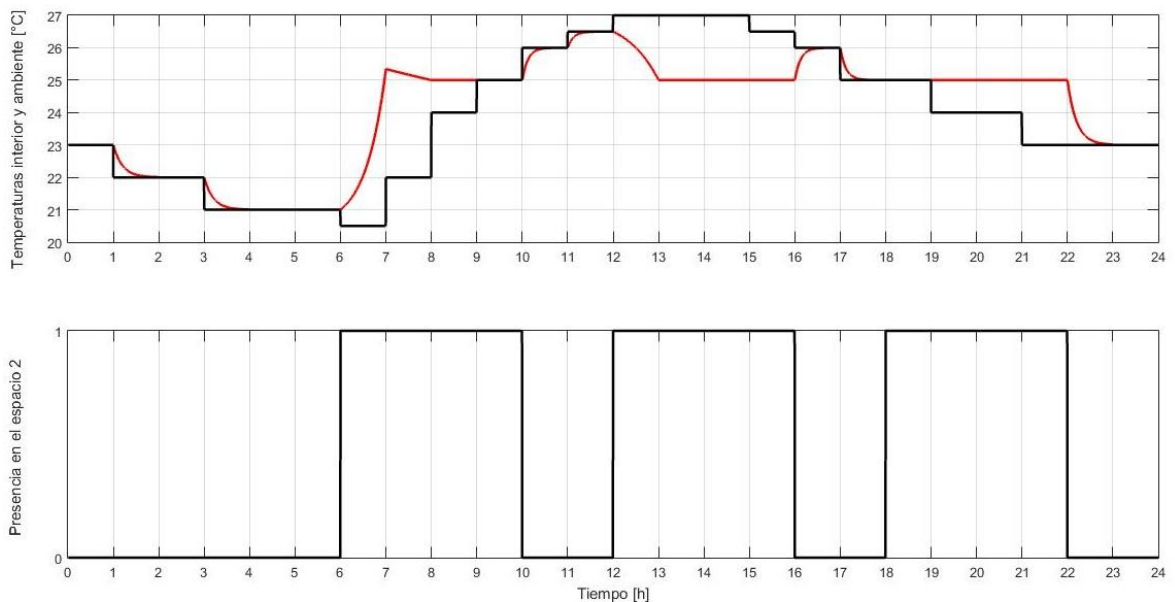


Figura 51. Comportamiento de la temperatura interior, temperatura ambiente y presencia en el espacio 2.

A diferencia de los espacios anteriores, en el espacio 3 se ejecuta la estrategia de ventilación forzada además de la ventilación natural y el aire acondicionado. En la parte superior de la *Figura 52* se presenta el comportamiento de la temperatura interior (rojo) y la temperatura ambiente (negro) del espacio 3, mientras que en la parte inferior se muestran las horas de uso del espacio.

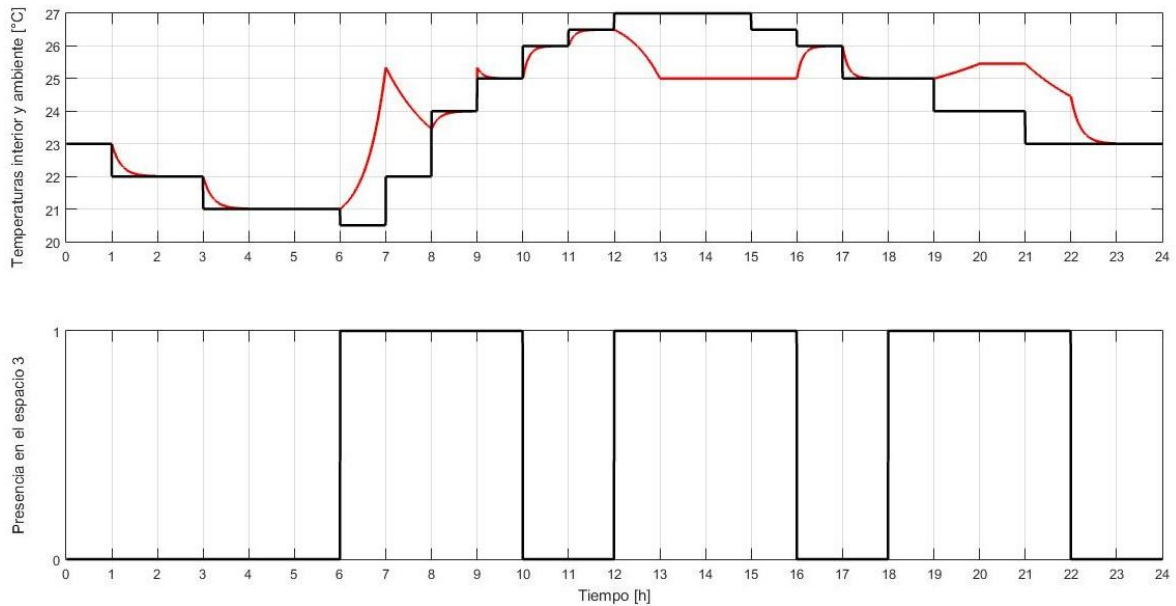


Figura 52. Comportamiento de la temperatura interior, temperatura ambiente y presencia en el espacio 3.

Cabe resaltar que cuando se presentan temperaturas más altas a la temperatura de *comfort* en las figuras 50, 51 y 52, se debe a que en esas horas no se aplica ninguna estrategia de climatización, esto es porque en dichas horas no hay presencia de personas en el espacio.

7 ANÁLISIS DE TENDENCIAS

Con los resultados obtenidos se realizó un análisis de sensibilidad y tendencia con el objetivo de identificar lineamientos que puedan considerarse criterios de diseño.

Para establecer tendencias se tomaron ciertas variables de análisis que permiten observar el comportamiento del modelo de optimización, realizando cambios en dichas variables para determinar en cada caso el VPN del proyecto. Entre las variables que se observaron conjuntamente están:

- Área de la ventana que permite el ingreso de aire.
- Temperatura de confort.
- Horas de uso en cada uno de los espacios durante el día, junto con la carga térmica que generan la presencia de personas, equipos de cómputo y proyectores.

A continuación se muestran los resultados obtenidos luego de realizar el proceso de optimización en la técnica de programación no lineal (PNL).

- **ÁREA DE LA VENTANA QUE PERMITE EL INGRESO DE AIRE**

Para establecer una posible tendencia se analizaron distintos tamaños de ventanas buscando anular y maximizar el uso de la ventilación natural (área de la ventana que permite el ingreso de aire). Los valores que se tomaron se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22. Tendencia Área Ventana vs VPN

<i>Aw</i> [m ²]	<i>VPN</i> [M\$]	<i>%Uso</i> <i>AAI1</i>	<i>%Uso</i> <i>VF1</i>	<i>%Uso</i> <i>VN1</i>	<i>%Uso</i> <i>AAI2</i>	<i>%Uso</i> <i>VF2</i>	<i>%Uso</i> <i>VN2</i>	<i>%Uso</i> <i>AAI3</i>	<i>%Uso</i> <i>VF3</i>	<i>%Uso</i> <i>VN3</i>
3,25	207,523	57,14	0	42,86	58,33	0	41,7	58,33	0	41,7
2	268,902	64,29	0	35,71	91,67	0	8,33	91,67	0	8,33
1	269,220	85,71	0	14,29	91,67	0	8,33	50	41,67	8,33
0,5	279,008	92,86	0	7,143	100	0	0	50	50	0
0,25	281,64	100	0	0	100	0	0	50	50	0
0,125	281,64	100	0	0	100	0	0	50	50	0

Se observa que los valores de VPN son inversamente proporcionales al tamaño de la ventana, esto se presenta debido a que cuando decrece el área de la ventana se hace más necesario el uso de aire acondicionado y/o extractores durante el día aumentando el costo de operación para mantener la temperatura de confort requerida; esto se observa con mayor detalle en la *Figura 53*.

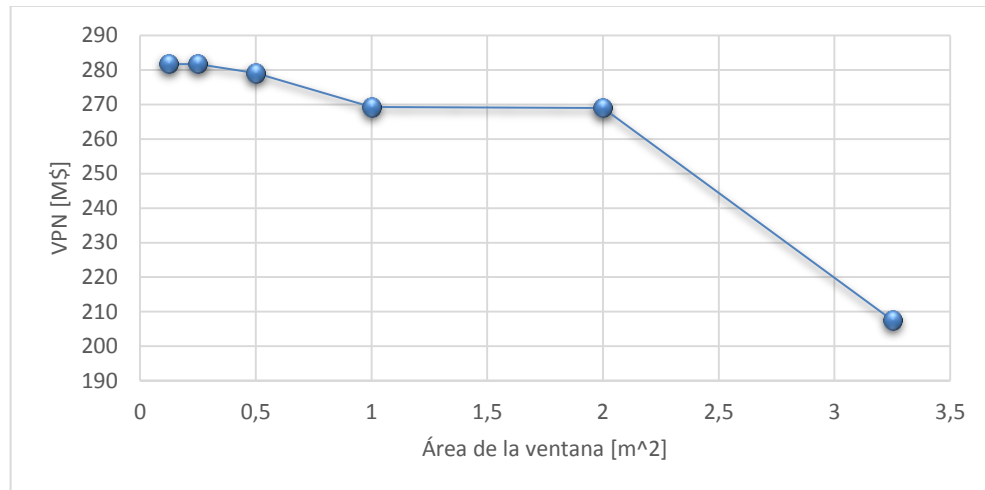


Figura 53. Área de la ventana vs VPN.

- TEMPERATURA DE CONFORT

La temperatura confort es un valor establecido de bienestar térmico que es la restricción a la cual debe regirse cada espacio en su sensación térmica; al variar dicha temperatura se pueden observar variaciones (Ver Tabla 23) en el porcentaje de uso de cada estrategia de climatización en cada espacio.

Tabla 23. Tendencia Tconfort vs VPN.

<i>Tconfort</i> [°C]	<i>VPN</i> [M\$]	% <i>Uso</i> <i>AAI1</i>	% <i>Uso</i> <i>VF1</i>	% <i>Uso</i> <i>VN1</i>	% <i>Uso</i> <i>AAI2</i>	% <i>Uso</i> <i>VF2</i>	% <i>Uso</i> <i>VN2</i>	% <i>Uso</i> <i>AAI3</i>	% <i>Uso</i> <i>VF3</i>	% <i>Uso</i> <i>VN3</i>
25,0	292,067	92,9	0,0	7,1	100,0	0,0	0,0	75,0	25,0	0,0
25,5	269,22	85,71	0,00	14,29	91,67	0,00	8,33	50,00	41,67	8,33
26,0	256,045	78,6	0,0	21,4	91,7	0,0	8,3	50,0	41,7	8,3
26,5	242,911	64,3	0,0	35,7	50,0	41,7	8,3	50,0	41,7	8,3
27,0	225,772	57,1	0,0	42,9	50,0	41,7	8,3	33,3	58,3	8,3

En la medida en que aumenta la temperatura de confort disminuye el valor presente neto (VPN), esto debido a que el rango de ventilación natural aumenta, lo que conlleva a una disminución en las horas de uso de la estrategia de aire acondicionado y/o extractores. El resultado se muestra en la *Figura 54*.

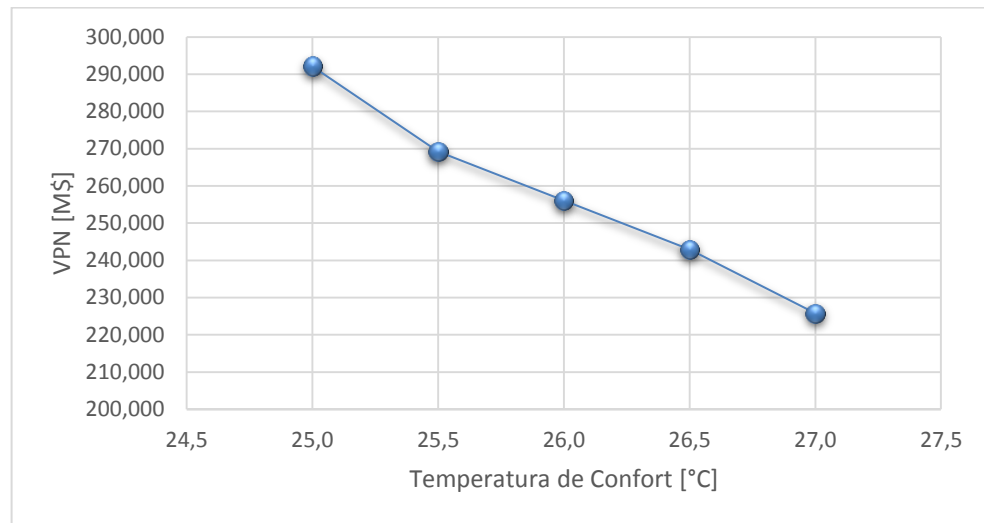


Figura 54. Temperatura de confort vs VPN

- HORAS DE USO EN CADA ESPACIO

Se varió la presencia durante las horas del día en cada uno de los espacios maximizando el número de personas a su mayor capacidad y utilizando de la misma manera la carga térmica generada por equipos de cómputo, personas y proyectores, los resultados están consignados en la Tabla 24.

Tabla 24. Horas presencia en cada espacio vs VPN.

<i>Horas presencia espacio 1</i>	<i>Horas presencia espacio 2</i>	<i>Horas presencia espacio 3</i>	<i>% Uso del espacio</i>	<i>VPN [M\$]</i>
4	3	3	25	138,248
7	6	6	50	190,204
14	12	12	100	269,220
16	16	16	133	323,808

El tiempo de uso de cada espacio es directamente proporcional al valor presente neto, ya que la estrategia de climatización debe extenderse a los horarios que antes no se habían contemplado y además, al maximizar las cargas térmicas en cada espacio la temperatura interior tiende a subir (ver Figura 55) teniendo que maximizar también los esfuerzos para mantenerla en un estado de confort. El VPN aumenta principalmente en el costo de la energía de operación (C_{opt}).

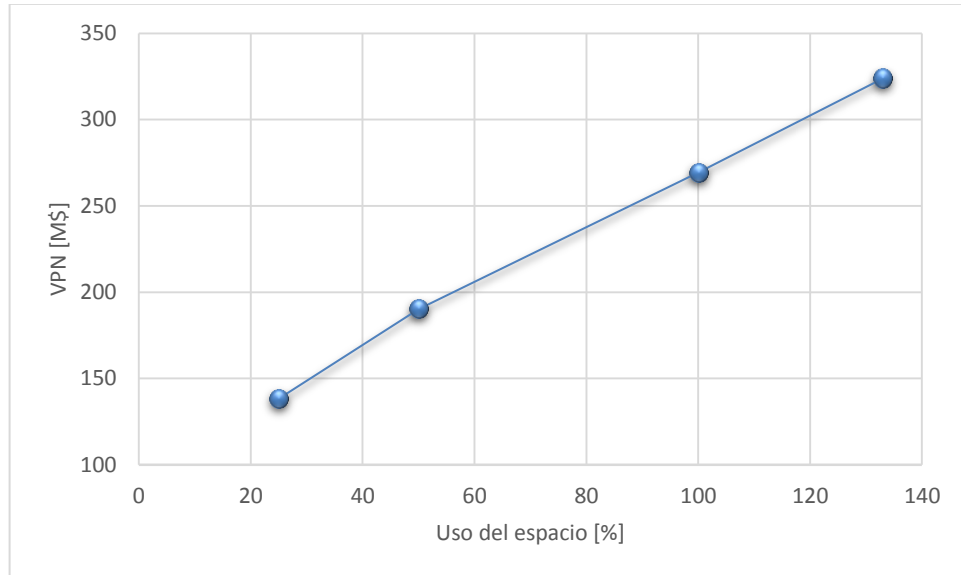


Figura 55. Uso del espacio vs VPN

La figura anterior establece una tendencia que indica que a medida que el número de personas dentro de cada espacio aumenta, el valor presente también lo hará, lo que ocurre principalmente por el incremento en el costo del consumo energético (C_{opt}).

8 CONCLUSIONES

El planteamiento del problema de optimización permitió darle solución al problema de climatización híbrido inteligente de un entorno en un clima tropical. Esto se logró probar gracias a que se obtuvieron resultados que cumplen con todos los requerimientos impuestos al problema, algunos financieros y otros técnicos, propios del problema de climatización. Dichos requerimientos, junto con el adecuado planteamiento del modelo térmico del sistema, se combinaron para dar forma al problema de optimización, que buscó encontrar un conjunto de elementos que garantizarán tanto el confort térmico de los espacios de trabajo como la solución financiera más óptima, esto de acuerdo a los tipos de tecnologías, la cantidad de equipos y los tipos de estrategias de climatización con que se contaba.

El modelo térmico utilizado, basado en un enfoque de calor latente, permitió representar de manera precisa las características de los espacios de trabajo y de los elementos presentes en dichos lugares, describiendo la manera como el fenómeno de transferencia de calor entre los espacios exterior e interior interactúa junto con las estrategias de climatización y el componente tecnológico del problema de optimización, para buscar la solución óptima que garantizara el cumplimiento de las restricciones térmicas que se tenían en el problema de climatización. Por medio de este modelo fue posible proponer un sistema de automatización que permitiera controlar las estrategias de climatización que garantizan un valor de la temperatura interior de los espacios por debajo de unos límites establecidos.

El sistema de automatización para controlar la operación de las estrategias de climatización permitió dar mayor comprensión en la forma como deben interactuar dichas estrategias con el componente tecnológico dispuesto para la instrumentación del sistema, los cuales deben trabajar armónicamente para garantizar el confort térmico de cada espacio durante el día. Cabe aclarar, que el sistema de automatización es sólo una propuesta que cumple con las condiciones de este proyecto, pero que su completo desarrollo y posterior implementación no están incluidas dentro de los objetos de estudio de este proyecto.

Algoritmos genéticos demostró ser un método eficaz a la hora de buscar una solución óptima para el problema, ya que los resultados obtenidos muestran el comportamiento deseado. Fue necesario ajustar los parámetros del algoritmo de acuerdo a las características propias del problema para obtener una solución que lograra cumplir con las condiciones deseadas. La elección de un tipo de población equivocado puede llevar a que el algoritmo no cumpla con todas las restricciones del problema. Aunque se espera que el algoritmo presente una convergencia rápida hacia el punto óptimo, se pudo comprobar que debido al alto grado de aleatoriedad con que este trabaja y que la región de búsqueda delimitada por las variables del problema presenta un número importante de mínimos locales, dicha convergencia se hace más difícil de encontrar y mostró la necesidad de introducir valores grandes en el tamaño de la población, el número de generaciones y la probabilidad de reproducción de los individuos.

Al realizar la simulación del problema de optimización en GAMS, se concluyó que se debe tener especial cuidado con la elección del *solver*, ya que existen algunos que no cumplen con las necesidades requeridas para ejecutar el modelo, por esta razón fue necesario realizar pruebas con los distintos *solvers* que permitieran resolver el problema mediante MINLP. Las pruebas realizadas con GAMS arrojaron resultados coherentes y óptimos, y se comprobó que la solución del problema se vuelve más compleja y el tiempo en que el sistema computacional puede resolverlo aumenta al elevar el número de estrategias de climatización.

El modelado térmico de una sección de edificio a través de un circuito RC permitió analizar de una manera experimental la temperatura interior de cada uno de los espacios y de esta manera se logró observar que dicha temperatura al ser calculada teóricamente siguiendo el modelo térmico concordaba con la temperatura hallada experimentalmente utilizando el circuito eléctrico que modela el comportamiento térmico del sistema, lo que permitió comprobar el correcto planteamiento del modelo térmico y a su vez proporcionó una herramienta importante para comprobar la estrategia de climatización encontrada con el modelo de optimización.

Al realizar la comparación de los resultados obtenidos con cada una de las técnicas fue posible probar que en términos de tiempo total de ejecución, el algoritmo genético presenta desventaja respecto a la programación realizada en GAMS, a pesar del gran número de iteraciones que puede realizar gracias a la

memoria que posee y de la forma inteligente para abordar el problema. Se comprobó que el individuo óptimo obtenido, es el vector de diseño que mejor cumple con las restricciones del problema de climatización y que entrega a su vez el valor mínimo de la función objetivo (valor presente neto), demostrando de esta manera que existen otras posibles soluciones para resolver problemas de climatización que mejoran los resultados que se obtienen con la estrategia tradicional (aires acondicionados independientes).

Se comprobó que la solución obtenida tras el proceso de optimización no es la tradicional (aire acondicionado independiente para cada espacio), sino que existen otras soluciones que la complementan y también cumplen con los requerimientos mínimos exigidos por el problema de optimización y aseguran el confort térmico en todo momento. Este resultado fue de utilidad para mostrar que con la elección adecuada de los diferentes tipos de elementos y las cantidades necesarias se puede optimizar el diseño de climatización del entorno de estudio. Evidentemente estos resultados cambiarán si se implementa el modelo de optimización en un entorno con condiciones diferentes, pero la flexibilidad del modelo permitirá hacer los ajustes necesarios en los parámetros del nuevo modelo y de esta manera determinar la solución óptima ante dichas condiciones.

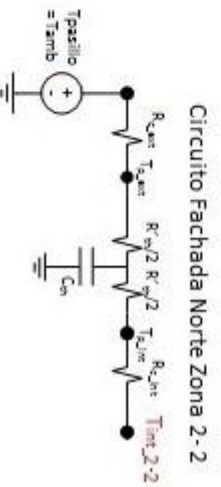
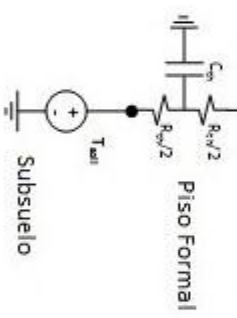
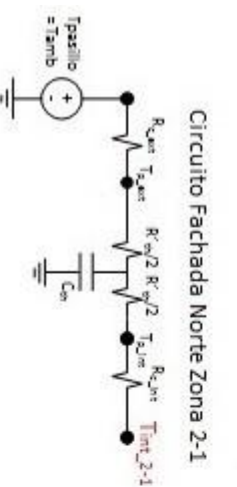
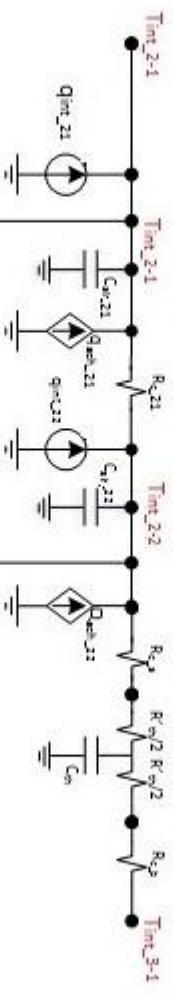
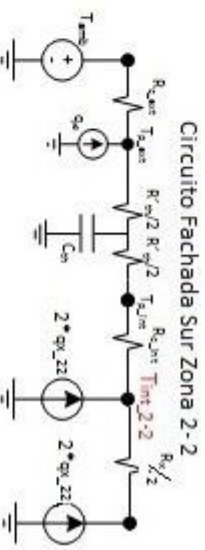
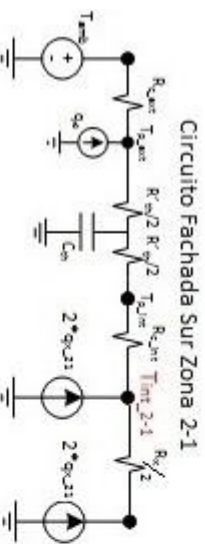
REFERENCIAS

- [1] A. Laespada, G. Pichetto, and V. Francés, “El análisis de cargas en climatización como herramienta de ahorro de energía,” Valencia, 2000.
- [2] E. P. Esteban and A. G. Ferrer, “El ahorro energético en la climatización de edificios,” 2000.
- [3] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR), “Ahorro y recuperación de energía en instalaciones de climatización,” *Efic. y Ahorr. Energético*, 2012.
- [4] C. A. F. Perez, “Adaptabilidad higrotermica de la vivienda tradicional,” 2014.
- [5] T. Schulze and U. Eicker, “Controlled natural ventilation for energy efficient buildings,” *Energy Build.*, vol. 56, pp. 221–232, Jan. 2013.
- [6] J. Laverge, N. Van Den Bossche, N. Heijmans, and a. Janssens, “Energy saving potential and repercussions on indoor air quality of demand controlled residential ventilation strategies,” *Build. Environ.*, vol. 46, no. 7, pp. 1497–1503, Jul. 2011.
- [7] S. Bergero and A. Chiari, “On the performances of a hybrid air-conditioning system in different climatic conditions,” *Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 5261–5273, Aug. 2011.
- [8] T. Sookoor, B. Holben, and K. Whitehouse, “Feasibility of Retrofitting Centralized HVAC Systems for Room-Level Zoning,” Charlottesville, VA.
- [9] G. Osma, “Modelado y optimización del diseño energético de viviendas a partir de aplicaciones URE,” Universidad Industrial de Santander.
- [10] G. Sánchez and L. A. Luengas, “Aplicación del modelo RC en sistemas biológicos (mecánica ventilatoria),” 10, 2011.
- [11] M. E. Salgado, J. I. Yuz, and R. A. Rojas, *ANÁLISIS DE SISTEMAS LINEALES*, 1st ed. Valparaíso, CHILE: Universidad Técnica Federico Santa María, 2012.
- [12] “Modelos matemáticos de sistemas físicos lineales,” 2009. [Online]. Available: http://exordio.qfb.umich.mx/archivos_pdf_de_trabajo_umsnh/libros/2634854-MODELOS-MATEMATICOS-DE-SISTEMAS-FISICOS.pdf.
- [13] Q. Jimenez, “Capítulo II: Modelos matemáticos dinámicos,” in *CONTROL I*, Yucatán, Mexico: Instituto Tecnológico de Mérida, 2009, pp. 1–23.

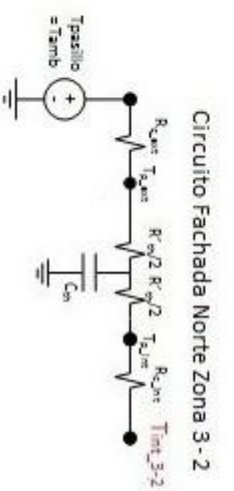
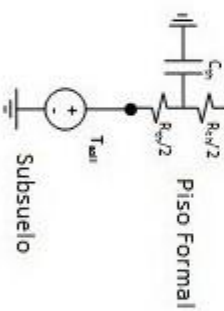
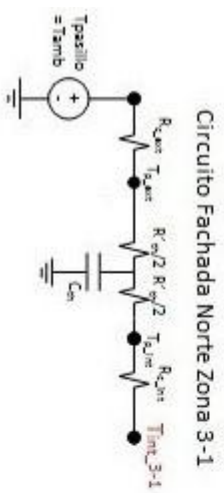
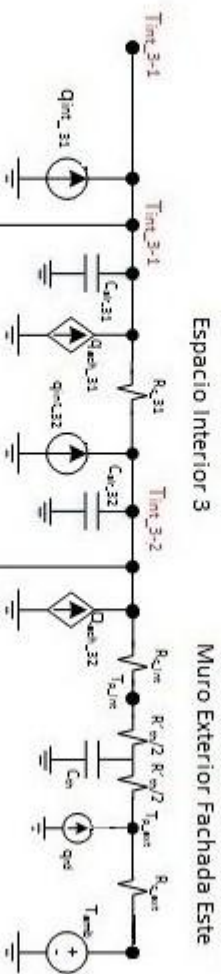
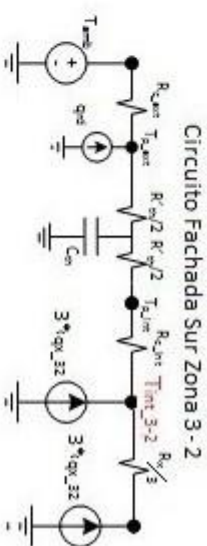
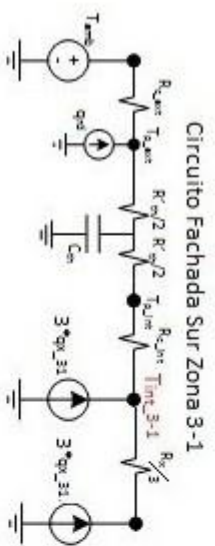
- [14] “Resistencia eléctrica - Wikipedia, la enciclopedia libre.” [Online]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia_el%C3%A9ctrica. [Accessed: 01-Feb-2014].
- [15] “Capacidad eléctrica - Wikipedia, la enciclopedia libre.” [Online]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Capacitancia>. [Accessed: 01-Feb-2014].
- [16] N. Fonseca Diaz and J. Opdenacker, “Modelamiento simplificado de un edificio de una zona mediante una red R-C para aplicaciones HVAC.,” *Univ. Tecnológica Pereira*, no. 44, pp. 37–42, 2010.
- [17] “Climatización.” [Online]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Climatización>. [Accessed: 08-Jan-2014].
- [18] “Climatización.” [Online]. Available: <http://www.refrigeracion.pro/climatizacion>. [Accessed: 08-Jan-2014].
- [19] H. Juárez Mondragón, “Sistemas de aire acondicionado,” Ciudad de México, Distrito Federal, 2006.
- [20] V. A. Fuentes Freixanet, “Ventilación Natural,” in *ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA*, 1st ed., Ciudad de México, Distrito Federal: Universidad Autónoma Metropolitana- Azcapotzalco, 2004, pp. 83–99.
- [21] C. Escobar Burgos and G. Pulido Lopez, “Tema 4. Análisis de viento. Software para análisis de diseño sustentable.,” Málaga, España, 2012.
- [22] M. B. Ferrero, O. J. A. Chiotti, and N. Scenna, “Modelado, simulación y optimización de procesos químicos,” N. Scenna, Ed. Buenos Aires, Argentina: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, 1999, pp. 435–495.
- [23] S. Rao, *Engineering optimization: theory and practice*, 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2009.
- [24] J. Amaya A., *Optimización para estudiantes de ingeniería*. Santiago: Universidad de Chile, 2009.
- [25] L. Zerpa, “Programación No Lineal,” Universidad del Zulia, Zulia, Venezuela, 2006.
- [26] M. Ison, J. Sitt, and M. Trevisan, “Algoritmos Genéticos: Aplicación En MATLAB.” 2005.
- [27] I. Uzin Larrañaga, J. Echanobe, and I. Del Campo, “Diseño e implementación de un algoritmo genético sobre dispositivos de lógica programable.” 2010.
- [28] M. Galante, “Algoritmo genético simple para la optimización de estructuras planas articuladas.,” España, 2002.

- [29] R. I. Haupt and S. F. Haput, "Practical genetic algorithms." 2004.
- [30] "Find minimum of function using genetic algorithm - MATLAB ga." [Online]. Available: http://www.mathworks.com/help/gads/ga.html?s_cid=srchtitle. [Accessed: 28-Apr-2015].
- [31] A. Parra Trayo, "Algoritmos geneticos," 2008.
- [32] R. Jimenez, "Diseño de un controlador lógico difuso, aplicado al controlador de posición de un servomotor de C.D, usando un algoritmo genético," Veracruz, 2007.
- [33] P. Tolmos Rodriguez, "Introduccion a los algoritmos genéticos y sus aplicaciones." 2005.
- [34] F. Carreto Lopez, "Optimización global con algoritmos genéticos," 2010.

CIRCUITO ELECTRICO DEL ESPACIO 2



CIRCUITO ELECTRICO DEL ESPACIO 3



A.1.2 Variables consideradas para el planteamiento del modelo térmico de los espacios y el menor costo financiero.

Los datos de la tabla () se establecieron empleando el software SOLEA-2 de la Universidad de la Gran Canaria en España. Este programa calcula la intensidad solar instantánea y diaria para cualquier localidad, época y nubosidad, sobre las principales orientaciones y para cualquier plano inclinado.

<i>Temperatura ambiente</i>	<i>Radiación solar difusa en la fachada norte</i>	<i>Radiación solar difusa en fachada sur</i>
°C	W/m ²	W/m ²
23	0	0
22	0	0
22	0	0
21	0	0
21	0	0
21	0	0
20,5	32,6	15
22	95,7	37
24	152,2	58
25	198,3	81
26	231,0	132
26,5	247,9	170
27	247,9	185
27	231,0	205
27	198,3	220
26,5	152,2	225
26	95,7	180
25	32,6	65
25	0	0
24	0	0
24	0	0
23	0	0
23	0	0
23	0	0

Los datos que se presentan a continuación son la velocidad del viento, la presencia en los diferentes espacios y la carga térmica, éstos se utilizan como vectores en las variables que hacen parte de la función objetivo o las restricciones.

<i>Cargas térmicas en el espacio 1</i>	<i>Cargas térmicas en el espacio 2</i>	<i>Cargas térmicas en el espacio3</i>	<i>Velocidad del viento</i>	<i>Presencia en el espacio 1</i>	<i>Presencia en el espacio 2</i>	<i>Presencia en el espacio 3</i>
W	W	W	m/s	-	-	-
-	-	-	0,10	0	0	0
-	-	-	0,00	0	0	0
-	-	-	0,10	0	0	0
-	-	-	1,00	0	0	0
-	-	-	1,30	0	0	0
-	-	-	0,20	0	0	0
2680	6260	6260	1,10	1	1	1
2680	6260	6260	0,60	1	1	1
2440	5780	5780	1,40	1	1	1
2440	5780	5780	1,30	1	1	1
-	-	-	0,80	0	0	0
-	-	-	0,00	0	0	0
2200	5300	5300	1,30	1	1	1
2200	5300	5300	1,50	1	1	1
2200	5300	5300	0,80	1	1	1
2440	5780	5780	1,10	1	1	1
2680	-	-	1,40	1	0	0
2680	-	-	1,10	1	0	0
2680	6260	6260	0,20	1	1	1
2680	6260	6260	1,10	1	1	1
2680	6260	6260	1,10	1	1	1
2680	6260	6260	0,20	1	1	1
-	-	-	0,00	0	0	0
-	-	-	0,30	0	0	0

A.1.2.1 Cargas térmicas en los espacios

La carga térmica de cada espacio depende de las cargas generadas por las personas, las Cargas de iluminación, cargas generadas por equipos eléctricos e informáticos, entre otros.

La ganancia de carga sensible debida a las aportaciones internas del local (Q_{sai}) se determina a su vez como suma de las siguientes tipos de cargas que se generan dentro del mismo:

$$Q_{sai} = Q_{sil} + Q_{sp} + Q_{se}$$

Donde,

Q_{sil} es el valor de la ganancia interna de carga sensible debida a la iluminación interior del local (W);

Q_{sp} es la ganancia interna de carga sensible debida a los ocupantes del local (W);

Q_{se} es la ganancia interna de carga sensible debida a los diversos aparatos existentes en el local, como aparatos eléctricos, ordenadores, etc. (W).

- Carga sensible por iluminación (Q_{sil}):

Para el cálculo de la carga térmica sensible aportada por la iluminación interior del establecimiento se considerará que la potencia íntegra de las lámparas de iluminación se transformará en calor sensible.

$$Q_{sil, incandescente} = n \cdot Pot_{Lámp_incandescente}$$

Siendo n el número de lámparas de tipo incandescentes colocadas.

- Carga sensible por presencia de personas (Q_{sp}):

La expresión para obtener el calor sensible de aporte por la ocupación del local sería la siguiente:

$$Q_{sp} = n \cdot C_{sensible, persona}$$

n , número de personas que se espera que ocupen el local;

$C_{sensible, persona}$, calor sensible por persona y actividad que realice, en este caso la persona estará en reposo.

- **Carga sensible por aparatos eléctricos (Q_{se}):**

Para el cálculo de la carga térmica aportada por la maquinaria, equipos y demás electrodomésticos presentes en el espacio climatizado del local se considerará que la potencia íntegra de funcionamiento de las máquinas y equipos presente en ese recinto se transformará en calor sensible.

- **Cálculo de cargas térmicas total**

Según la manera como se calculan las cargas sensibles térmicas dentro de un espacio se toman las siguientes tablas, donde se condensan las variables necesarias en cada caso.

Cargas internas	W	Área (m ²)	Máximo de Personas por espacio
Personas	80	Espacio 1 30	20
Lámparas	80	Espacio 2 60	40
Computadores	100	Espacio 3 100	60
Proyectores	500		

En el caso de la conversión de potencia en carga térmica, se tiene la siguiente tabla.

% conversión en carga térmica	
Lámparas	100%
Computadoras	100%
Proyectores	100%

Para el máximo de personas por espacio se consultó el decreto 3020 numeral 5 expedido en el año 2002 que dicta las Relaciones técnicas alumno docente, - La

capacidad física de las aulas para atender a los estudiantes de acuerdo con los parámetros establecidos (1.2 metros cuadrados por alumno en instituciones ya existentes, 1.65 en las instituciones cuyas construcciones sean nuevas)-.

Ahora, considerando que el análisis se hace para las 24 horas del día, se presentan las siguientes consideraciones en cuanto a número de personas, equipos electrónicos y lámparas presentes en el espacio 1.

Personas en el espacio 1 (Max. 20)	Lámparas encendidas espacio 1	Computadoras encendidas Espacio 1	Proyector encendido Espacio 1.
# personas	Unid	Unid	Unid
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
20	6	1	1
20	6	1	1
20	3	1	1
20	3	1	1
0	0	0	0
0	0	0	0
20	0	1	1
20	0	1	1
20	0	1	1
20	3	1	1
20	6	1	1
20	6	1	1
20	6	1	1
20	6	1	1
20	6	1	1
20	6	1	1
0	0	0	0
0	0	0	0

Considerando que el análisis se hace para las 24 horas del día, se presentan las siguientes consideraciones en cuanto a número de personas, equipos electrónicos y lámparas presentes en el espacio 2.

<i>Personas en espacio 2 (Max. 40)</i>	<i>Lámparas encendidas espacio 2</i>	<i>Computadoras Encendidas espacio 2</i>	<i>Proyectores encendidos espacio 2</i>
# personas	Unid	Unid	Unid
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
35	12	20	1
35	12	20	1
35	6	20	1
35	6	20	1
0	0	0	0
0	0	0	0
35	0	20	1
35	0	20	1
35	0	20	1
35	6	20	1
0	0	0	1
0	0	0	1
35	12	20	1
35	12	20	1
35	12	20	1
35	12	20	1
0	0	0	0
0	0	0	0

Considerando que el análisis se hace para las 24 horas del día, se presentan las siguientes consideraciones en cuanto a número de personas, equipos electrónicos y lámparas presentes en el espacio 3.

<i>Personas en el espacio (Max. 60)</i>	<i>Lámparas encendidas espacio 3</i>	<i>Computadoras encendidas espacio 3</i>	<i>Proyectores encendidos espacio 3</i>
# personas	Unid	Unid	Unid
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
35	12	20	1
35	12	20	1
35	6	20	1
35	6	20	1
0	0	0	0
0	0	0	0
35	0	20	1
35	0	20	1
35	0	20	1
35	6	20	1
0	0	0	0
0	0	0	0
35	12	20	1
35	12	20	1
35	12	20	1
35	12	20	1
0	0	0	0
0	0	0	0

ANEXO B. COMPARACION DEL COSTO Y ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LOS SENSORES Y DETECTORES DE APERTURA.

En esta sección se realiza la comparación de la instrumentación a utilizar en el proyecto de investigación, esta comparación se ejecuta tomando en cuenta la oferta disponible en el mercado nacional.

Anexo B.1 Comparación sensores y detectores de apertura

Para los sensores de presencia se hace una comparación entre las especificaciones técnicas como el rango de cobertura y la temperatura de trabajo y el costo del sensor. Se muestran continuación algunas referencias de las cuales se escogen las que se consideran más adecuadas para cada espacio.

Referencia	Cobertura	Temperatura de trabajo	Precio €	Fabricante
8241.9/8441.9	<i>96m²- 1,2 m altura</i>	-5 – 45 °C	190,48	<i>ABB</i>
27342-35	<i>5m² – 1,2 m altura</i>	0 – 50 °C	19,11	<i>Simon</i>
BMSA1101	<i>39m² - 6 m altura</i>	-5 – 45 °C	35,90	<i>Bticino</i>
BMSA1203	<i>50m² - 8m altura</i>	-5 – 45 °C	35	<i>Bticino</i>
VE1012	<i>12m² - 3 m altura</i>	-10 – 55°C	80,17	<i>UTC</i>

Para el espacio 1 se considera un sensor BMSA1101, para el espacio 2 dos sensores BMSA1101 y para el espacio 3 dos sensores BMSA1203.

BMSA1101



Interruptor de detección de sensor infrarrojo pasivo de movimiento y nivel de tecnología de iluminación "Zero Crossing", ON / OFF de control de la carga, para instalar en pared o en techo el grado de protección IP42 ,tornillo terminal de conexión , área de cobertura de una anchura de 6 m de 180 ° y la profundidad de campo de 8 m para una altura de montaje de 2,5 m, una altura máxima de instalación de 6 m, 100-240 V AC , 50/60 Hz, carga máxima de 8,5 amperios a 230 V AC , retardo de 5 s a 30 minutos.

Para los sensores de temperatura se hace una comparación entre las especificaciones técnicas como el rango de temperatura, la precisión y el costo del sensor. Se escoge la mejor opción. Se debe tener en cuenta que deben haber tanto sensores en el interior del espacio como en el exterior del mismo.

Referencia	Rango	Precisión	Ambiente	Fabricante	Precio (US\$)
LRF2-TWRB-XX	0 – 40 °C	+/- 1 °C	Interior	<i>Lutran</i>	190
HMW88/89	-40 – 60 °C	+/- 1 °C	Interior	<i>Vaisala</i>	169
HMDW82	-5 – 50 °C	+/- 0.5	Exterior	<i>Vaisala</i>	286
OPTIGO 10	-30 – 50 °C	+/- 0.5 °C	Interior – Exterior	<i>Regin</i>	250
EE160	-10 – 50 °C	+/- 0.3 °C	Exterior	<i>E+E</i>	150
81810-39	0 – 45 °C	+/- 1 °C	Interior	<i>Loxone</i>	54,75

Dentro de los espacios interiores se considera que se puede utilizar el sensor con referencia 81810-39, para la parte exterior de los espacios se considera el sensor EE160.

81810-39



El sensor de temperatura 0-10V dispone de una carcasa adecuada para su uso en el interior de una vivienda y para colgarlo en la pared. El sensor de temperatura lleva un transductor 0-10V incorporado y puede ser conectado a cualquier dispositivo que puede manejar una señal estándar de 0-10V. El sensor es ideal para las siguientes aplicaciones:

- *Las mediciones de temperatura en interior.*
- *Los registros y estadísticas de temperatura.*
- *Diseñado para uso prolongado con el Miniserver o Extensión Loxone.*
- *Diseñado para usarlo con cualquier dispositivo que acepte una señal de 0-10V.*

Para los detectores de apertura se encontró que las diferencias entre las distintas referencias son mínimas, por esta razón se tomó el detector de referencia

AGTECH AG102 con precio de US\$17,27, se utilizaron 12 detectores de presencia para las 12 ventanas de los espacios.

**AGTECH
AG102.**



Sensor con alarma de apertura de puertas y ventanas. Dispone de 3 tonos de alarma: reposo, alerta y alarma. Este detector funciona con la alarma AGTECH AG100+.

- *No necesita configuración (Plug & Play)*

Anexo B.2 Comparación de Aires Acondicionados y extractores

En esta sección del anexo B, se realiza la comparación entre las diferentes referencias de extractores y aires acondicionados independientes y con unidad central.

- **Aires Acondicionados independientes**

Para los aires acondicionados se tomaron las siguientes referencias comerciales.

Marca	TR	Modelo	MC (M\$)	TI (M\$)	Subtotal (M\$)	AIU (M\$)	Total (M\$)
Panasonic	2	CS-T24KB4Q6	3,359	1,680	5,039	1,008	6,046
YORK	3	YMKFXC036BBH-B-X	4,276	2,138	6,413	1,283	7,696
Panasonic	3,58	CS-T43KB4Q6	4,451	2,226	6,677	1,335	8,012
YORK	4	YMKFXC048BBH-B-X	4,952	2,476	7,427	1,485	8,913

- **Unidades centrales de aire acondicionado**

Marca	TR	Modelo	MC (M\$)	TI (M\$)	Subtotal (M\$)	AIU (M\$)	Total
TRANE	10	TSC120F3E0A0000	25,222	5,045	30,267	6,053	36,321
TRANE	15	EAC180A3E0A0000	32,285	6,457	38,743	7,749	46,491
TRANE	20	EAC240A3E0A0000	38,662	7,733	46,395	9,279	55,674

MC: Costo de manejadora y condensadora.

TI: Costo de tubería de cobre e instalación eléctrica.

Subtotal: MC+TI

AIU: Administración, utilidad e imprevistos.

Total: Valor de suministro, instalación y puesta en marcha.

- **Extractores (Ventilación Forzada)**

En el caso de los extractores se tomaron las referencias del mercado, donde se encontró principalmente extractores del fabricante Soler & Paul en la serie SILENT, por esta razón se tomaron las siguientes referencias para que el modelo de optimización las evalué y decida.

Referencia	Potencia [W]	Caudal [m^3]	Costo (\$)	Envío (\$)	Instalación (\$)	Total (\$)
TD-500/150-160 SILENT	66	580	614.000	353.000	100.000	1'067.000
TD-800/200 SILENT	115	880	837.000	446.000	100.000	1'382.000
TD-1000/200 SILENT	150	1100	1'345.000	446.000	100.000	1'890.000

ANEXO C. Rt y Cmnt PARA SOLUCION ÓPTIMA Y TRADICIONAL

Anexo C.1 Tablas de Rt y Cmnt solución óptima

En este anexo se mostrara los valores que toma a lo largo de los 20 años del proyecto el flujo neto de dinero anual (Rt) y el costo de mantenimiento anual (Cmnt).

- Flujo neto de dinero anual (Rt)

El flujo neto de dinero se muestra para los veinte años del proyecto, este hace referencia a la suma del costo de operación anual y el costo de mantenimiento anual en este caso de la unidad central de aire acondicionado. Es diferente cada 5 años debido a que en esos años está programado el mantenimiento de la unidad central de aire acondicionado.

	---- VAR Rt		
	LOWER	LEVEL	UPPER
1	.	13.826	+INF
2	.	13.826	+INF
3	.	13.826	+INF
4	.	13.826	+INF
5	.	25.607	+INF
6	.	13.826	+INF
7	.	13.826	+INF
8	.	13.826	+INF
9	.	13.826	+INF
10	.	25.607	+INF
11	.	13.826	+INF
12	.	13.826	+INF
13	.	13.826	+INF
14	.	13.826	+INF
15	.	25.607	+INF
16	.	13.826	+INF
17	.	13.826	+INF
18	.	13.826	+INF
19	.	13.826	+INF
20	.	25.607	+INF

- Costo de mantenimiento anual (Cmnt).

El costo del mantenimiento anual se encuentra a lo largo de los 20 años del proyecto, donde cada 5 años se hace un mantenimiento y durante ese tiempo se hacen mantenimientos preventivos. En la siguiente imagen se observa el costo del mantenimiento durante los 20 años de la unidad central de aire acondicionado.

---- VAR Cmnt

	LOWER	LEVEL	UPPER
1	.	1.350	+INF
2	.	1.350	+INF
3	.	1.350	+INF
4	.	1.350	+INF
5	.	13.131	+INF
6	.	1.350	+INF
7	.	1.350	+INF
8	.	1.350	+INF
9	.	1.350	+INF
10	.	13.131	+INF
11	.	1.350	+INF
12	.	1.350	+INF
13	.	1.350	+INF
14	.	1.350	+INF
15	.	13.131	+INF
16	.	1.350	+INF
17	.	1.350	+INF
18	.	1.350	+INF
19	.	1.350	+INF
20	.	13.131	+INF

Anexo C.2 Resultados estrategia tradicional de climatización.

- Aires acondicionados por cada espacio:
 - Espacio 1: 1 unidad de aire acondicionado independiente de 3TR.
 - Espacio 2: 2 unidades de aire acondicionado independiente de 3TR.
 - Espacio 3: 3 unidad de aire acondicionado independiente de 3,58TR.

- Inversión (Ro).

Elementos	Inversión [M\$]
1 aire acondicionado para espacio 1 - 3TR	7,696
2 aire acondicionado para espacio 2 - 3TR	15,392
3 aire acondicionado para espacio 3 – 3,58TR	24,036
Sensores de Temperatura	0,985626
Sensores de Presencia	0,715
Detectores de Apertura	0,7881
Total	49,613

- Costo mantenimiento (Cmnt)

---- VAR Cmnt

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1	.	0.600	+INF	.
2	.	0.600	+INF	.
3	.	0.600	+INF	.
4	.	0.600	+INF	.
5	.	12.381	+INF	.
6	.	0.600	+INF	.
7	.	0.600	+INF	.
8	.	0.600	+INF	.
9	.	0.600	+INF	.
10	.	12.381	+INF	.
11	.	0.600	+INF	.
12	.	0.600	+INF	.
13	.	0.600	+INF	.
14	.	0.600	+INF	.
15	.	12.381	+INF	.
16	.	0.600	+INF	.
17	.	0.600	+INF	.
18	.	0.600	+INF	.
19	.	0.600	+INF	.
20	.	12.381	+INF	.

- Costo de operación (Copt) = M\$17,099

- Flujo neto de dinero (Rt)

---- VAR Rt			
	LOWER	LEVEL	UPPER
1	.	17.699	+INF
2	.	17.699	+INF
3	.	17.699	+INF
4	.	17.699	+INF
5	.	29.480	+INF
6	.	17.699	+INF
7	.	17.699	+INF
8	.	17.699	+INF
9	.	17.699	+INF
10	.	29.480	+INF
11	.	17.699	+INF
12	.	17.699	+INF
13	.	17.699	+INF
14	.	17.699	+INF
15	.	29.480	+INF
16	.	17.699	+INF
17	.	17.699	+INF
18	.	17.699	+INF
19	.	17.699	+INF
20	.	29.480	+INF

- $V_{pn} = R_o + (R_t)(t_a) = M\$296,749$